



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR- TL 141584

**ANALISIS PENGARUH INTERNAL GEOMETRI
TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL
POLYLACTIC ACID (PLA) DIPREPARASI
MENGUNAKAN 3D PRINTING**

ARIF IMBANG PAMBUDI
NRP. 2713 100 032

Dosen Pembimbing
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
Dr. Eng. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISIS PENGARUH INTERNAL GEOMETRI
TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL
POLYLACTIC ACID (PLA) DIPREPARASI
MENGGUNAKAN *3D PRINTING***

**ARIF IMBANG PAMBUDI
NRP 2713100032**

Dosen Pembimbing
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
Dr. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

(halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

THE EFFECT OF INTERNAL GEOMETRY ON THE MECHANICAL PROPERTY OF 3D PRINTED POLYLACTIC ACID (PLA) MATERIAL

**ARIF IMBANG PAMBUDI
NRP 2713100032**

**Supervisor :
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
Dr. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.**

**MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2017**

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS PENGARUH INTERNAL GEOMETRI
TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL *POLYLACTIC
ACID (PLA)* DIPREPARASI MENGGUNAKAN 3D
PRINTING**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ARIF IMBANG PAMBUDI
NRP. 2713100032

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. (Pembimbing 1)
2. Dr. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc. (Pembimbing 2)



**ANALISIS PENGARUH INTERNAL GEOMETRI
TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL *POLYLACTIC
ACID* (PLA) DIPREPARASI MENGGUNAKAN 3D
*PRINTING***

Nama Mahasiswa : Arif Imbang Pambudi
NRP : 2713100032
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
Dr. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.

Abstrak

Proses riset dan penyempurnaan *Fused Deposition Modelling* 3D *Printer*, tentunya terdapat berbagai variabel dan parameter dengan tujuan menghasilkan objek tiga dimensi dengan hasil dan tingkat ketelitian mendekati desain aslinya serta dapat diaplikasikan seperti rancangan yang diharapkan. Selain pengaruh jenis *printer* pada metode FDM, material *filament* yang digunakan sebagai pengisi untuk mencetak objek tiga dimensi sudah tentu memiliki karakteristik sifat mekanik dan fisik yang berbeda, sehingga memungkinkan terjadinya perbedaan hasil objek untuk setiap material *filament* yang berbeda. Umumnya *filament* yang digunakan berasal dari material termoplastik jenis *Polylactid Acid* (PLA). Kondisi berikutnya yang berpengaruh adalah desain internal geometri dan dimensi dari objek yang akan dicetak. 3D *printing* FDM bekerja dengan prinsip *layering* dengan proses *bottom up* ketika mencetak objek. Hal tersebut dapat memengaruhi kualitas objek hasil cetak tiga dimensi, mengingat setiap objek memiliki ukuran yang berbeda dan desain geometri tertentu. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi internal geometri dan dimensinya terhadap sifat mekanik dari PLA menggunakan 3D *Printer*. Internal geometri yang divariasikan adalah *triangle* dan *honeycomb*, dengan variasi ketebalan setiap geometri 1 mm dan 2 mm, serta variasi sumbu simetri 4,5 mm dan

9 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sampel kontrol memiliki hasil kekuatan tarik dan bending yang sesuai dengan referensi *datasheet filament* PLA. Objek dengan internal geometri *triangle* berukuran 9 mm dan ketebalan 2 mm memiliki kekuatan tarik dan bending yang lebih baik dari geometri *honeycomb*.

Kata kunci : 3D Printing, internal geometri, Polylactic Acid, sifat mekanik

THE EFFECT OF INTERNAL GEOMETRY ON THE MECHANICAL PROPERTY OF 3D PRINTED POLYLACTIC ACID (PLA) MATERIAL

Name : Arif Imbang Pambudi
NRP : 2713100032
Department : Material and Metallurgical Engineering
Advisors : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D.
Dr. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc.

Abstrak

The process of research Fused Deposition Modelling 3D Printer of course there are many variables and various parameters with the aim of producing three-dimensional objects with the results and the level of accuracy approaching its original design and can be applied as the design expected. In addition to the influence of the type of printer in FDM method, filament material which is used as a filler for printing three-dimensional objects is certainly has different characteristic on mechanical and physical properties, thus enabling objects to any differences in the results of different filament material. Generally filament used came from a thermoplastic material types Polylactic Acid (PLA). Subsequent conditions that influence the internal geometry design and dimensions of the object to be printed. FDM 3D printing works on the principle of layering with a bottom-up process when printing the object. It can affect the quality of the printed three-dimensional objects, considering each object has a different size and design of specific geometry. This study was conducted to determine the effect of variations in the internal geometry and dimensions of the mechanical properties of PLA using a 3D printer. Internal geometry is varied triangle and honeycomb, with each geometry variations in thickness of 1 mm and 2 mm, then the variations of geometry size are 4,5 mm and 9 mm. The results showed that the control sample has a tensile and flexural strength results that correspond to the reference datasheet PLA filament. Triangle

object with internal geometry size 9 mm and thickness 2 mm has a tensile and flexural strength better than honeycomb geometry.

Keywords: 3D Printing, internal geometry, Polylactic Acid, mechanical properties

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur hanyalah milik Allah SWT, Tuhan Semesta Alam yang telah memberikan penulis limpahan rahmat untuk menyelesaikan laporan Tugas Akhir tentang ***“Analisis Pengaruh Internal Geometri Terhadap Sifat Mekanik Material Polylactic Acid (PLA) Dipreparasi Menggunakan 3D Printing”***. Adapun laporan ini disusun dan diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri (FTI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang selalu mencurahkan rahmat, anugerah, dan karunia kepada penulis untuk dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini,
2. Kedua orang tua penulis, yang selalu mendoakan dan memberi dorongan motivasi selama ini,
3. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
4. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D. dan Dr. Hosta Ardhyanta, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah memberikan arahan, bimbingan dan masukan kepada penulis,
5. Dosen – dosen Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, yang memberikan ilmu selama penulis menempuh pendidikan S1,
6. Karyawan Laboratorium Inovasi Material dan Laboratorium Karakterisasi Material Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS, yang telah memberi bantuan dalam hal teknis dan pengambilan data penelitian,
7. Keluarga Laboratorium Inovasi Material, Arief, Afira, Asis, Bathara, Jonathan, Zul, dan Iqbal yang telah saling membantu dan menguatkan dalam pengerjaan Tugas Akhir penulis,
8. Seluruh kolega angkatan 2013 yang selalu saling menguatkan dalam bingkai keriaan,

9. Dan seluruh pihak yang tidak dapat ditulis satu persatu disini yang telah memberikan kontribusi atas penulisan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan di berbagai sudutnya. Namun, dengan tulus penulis berharap bahwa laporan ini dapat bermanfaat bagi semua orang.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Rapid Prototyping</i>	5
2.2 <i>Fused Deposition Modelling 3D Printing</i>	6
2.3 Komposit	11
2.4 Polimer	13
2.5 <i>Polylactic Acid</i>	15
2.6 Sifat Mekanik Polimer Termoplastik	17
2.7 Penelitian Sebelumnya	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Bahan Penelitian	27
3.2 Peralatan dan Pengujian	27
3.3 Diagram Alir Penelitian	29
3.4 Prosedur Penelitian	32
3.5 Rancangan Penelitian	33
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisis parameter pencetakan	

<i>filament polylactic acid</i>	37
4.2 Analisis pengujian FTIR <i>filament polylactic acid</i>	40
4.3 Analisis pengujian tarik	41
4.4 Perhitungan massa dan volume sampel uji tarik	49
4.5 Analisis simulasi tegangan menggunakan <i>software</i> Inventor	53
4.6 Analisis morfologi pengujian tarik	58
4.7 Analisis pengujian bending	62
4.8 Perhitungan massa dan volume sampel uji bending	68
4.9 Analisis morfologi pengujian bending	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	xix
LAMPIRAN	xxv
BIOGRAFI PENULIS	xxxi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Jenis – jenis <i>rapid prototyping</i> (O.S. Carneiro, 2015).....	6
Gambar 2.2	Diagram alir proses 3D <i>Printing</i> (Izabela Hager, 2016)	7
Gambar 2.3	Ilustrasi teknik FDM (O.S. Carneiro, 2015)	8
Gambar 2.4	Ilustrasi <i>nozzle head</i> (O.S. Carneiro, 2015).....	9
Gambar 2.5	Ilustrasi parameter proses ekstrusi FDM (O.S. Carneiro, 2015).....	9
Gambar 2.6	Tampilan <i>software</i> Cura 14.09 untuk mencetak objek 3D	10
Gambar 2.7	Ilustrasi <i>slicing</i> desain spesimen tensile (Zixiang Weng. 2016).....	11
Gambar 2.8	Penyusun komposit (Artikel teknologi.com)	13
Gambar 2.9	Jenis – jenis polimer (Rahmat Saptono, 2008) ...	14
Gambar 2.10	Struktur Poli Asam Laktat (Rahmat Saptono, 2008)	15
Gambar 2.11	Spesimenuji tarik dan perilaku polimer termoplastik pada umumnya (Rahmat Saptono, 2008)	17
Gambar 2.12	Kurva tegangan regangan suatu polimer termoplastik (Rahmat Saptono, 2008)	17
Gambar 2.13	Perilaku elastik polimer termoplastik (Rahmat Saptono, 2008)	18
Gambar 2.14	Perilaku plastik polimer termoplastik (Rahmat Saptono, 2008)	19
Gambar 2.15	Penciuatan polimer termoplastik <i>amorphous</i> pada pengujian tarik (Rahmat Saptono, 2008)...	20
Gambar 2.16	Tipe internal geometri sampel dan dimensi (<i>full, honeycomb, drill, stripes</i>).....	22
Gambar 2.17	Lebar spesimen hasil 3D <i>Printer</i>	23
Gambar 2.18	Tebal spesimen hasil 3D <i>Printer</i>	24
Gambar 2.19	Orientasi pencetakan spesimen 3D <i>Printer</i>	25
Gambar 3.1	<i>Filament polylactic acid</i>	27
Gambar 3.2	<i>Printer</i> Prusa i3.....	28

Gambar 3.3	Diagram alir penelitian	30
Gambar 3.4	Diagram alir proses 3D <i>Printer</i>	31
Gambar 3.5	Desain internal geometri dan dimensi (mm) spesimen uji tarik	34
Gambar 3.6	Desain internal geometri dan dimensi (mm) spesimen uji bending.....	35
Gambar 4.1	Spektrum infra merah <i>polylactic acid</i>	40
Gambar 4.2	Sampel uji tarik.....	42
Gambar 4.3	Grafik tegangan regangan maksimum uji tarik sampel <i>triangle</i>	44
Gambar 4.4	Grafik tegangan regangan maksimum uji tarik sampel <i>honeycomb</i>	44
Gambar 4.5	Grafik tegangan regangan maksimum uji tarik sampel dengan internal geometri 4,5 mm	45
Gambar 4.6	Grafik tegangan regangan maksimum uji tarik sampel dengan internal geometri 9 mm	46
Gambar 4.7	Grafik modulus elastisitas uji tarik	48
Gambar 4.8	Massa sampel uji tarik	50
Gambar 4.9	Volume sampel uji tarik.....	50
Gambar 4.10	Lokasi patahan pengujian tarik menggunakan <i>software</i> Inventor	54
Gambar 4.11	Spektrum warna nilai tegangan (biru : minimum, merah : maksimum)	55
Gambar 4.12	Patahan sampel hasil uji tarik	57
Gambar 4.13	Hasil SEM perbesaran 100x sampel uji tarik (a)TEN/K, (b)TEN/4,5/T, (c)TEN/9/T, (d)TEN/4,5/H, (e)TEN/9/H.....	59
Gambar 4.14	Hasil SEM perbesaran 200x sampel uji tarik (a)TEN/K, (b)TEN/4,5/T, (c)TEN/9/T, (d)TEN/4,5/H, (e)TEN/9/H.....	61
Gambar 4.15	Sampel uji bending	63
Gambar 4.16	Grafik tegangan regangan maksimum uji bending sampel <i>triangle</i>	64
Gambar 4.17	Grafik tegangan regangan maksimum uji bending sampel <i>honeycomb</i>	65
Gambar 4.18	Grafik tegangan regangan maksimum	

	uji bending sampel dengan internal geometri 4,5 mm	66
Gambar 4.19	Grafik tegangan regangan maksimum uji bending sampel dengan internal geometri 9 mm	67
Gambar 4.20	Grafik modulus elastisitas uji bending	68
Gambar 4.21	Massa sampel uji bending.....	69
Gambar 4.22	Volume sampel uji bending	70
Gambar 4.23	Defleksi sampel uji bending	72
Gambar 4.24	Hasil SEM perbesaran 100x sampel uji bending (a)FLE/K, (b)FLE/9/T, (c)FLE/9/H	73
Gambar 4.25	Hasil SEM perbesaran 200x sampel uji bending (a)FLE/K, (b)FLE/9/T, (c)FLE/9/H	74

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properti <i>polylactic acid</i>	16
Tabel 2.2 Kombinasi dari faktor proses dan <i>experiment labels</i>	21
Tabel 2.3 Parameter 3D Printer <i>stratasys</i>	23
Tabel 2.4 Parameter <i>injection moulding</i>	23
Tabel 2.5 Parameter 3D Printer	25
Tabel 3.1 Rasio panjang internal geometri spesimen penelitian	33
Tabel 3.2 Kode spesimen uji tarik.....	33
Tabel 3.3 Kode spesimen uji bending	34
Tabel 4.1 Parameter pencetakan menu basic pada aplikasi Cura 14.09	38
Tabel 4.2 Parameter pencetakan menu advance pada aplikasi Cura 14.09	39
Tabel 4.3 <i>Ultimate tensile strength</i> PLA.....	42
Tabel 4.4 Massa, volume, dan tegangan maksimum sampel uji tarik	52
Tabel 4.5 <i>Load</i> maksimum pengujian tarik	54
Tabel 4.6 <i>Flexural Strength</i> PLA	64
Tabel 4.7 Massa, volume, dan tegangan maksimum sampel uji bending.....	70

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Three dimensional (3D) *printing* menjadi salah satu mesin yang handal dan revolusioner pada teknik *additive manufacturing* (AM) untuk membuat objek tiga dimensi dengan struktur yang unik dan bermacam – macam. Teknik tersebut hingga sekarang diantaranya adalah *fused depositon modelling* (FDM), *stereolithography apparatus* (SLA), *continous liquid interface production* (CLIP), *digital light processing*, dan *selective laser sintering* (SLS). Pada akhir tahun 1980, S. Scott Crump mengembangkan FDM 3D *printer* dan dikomersialisasi pada 1990 oleh Stratasys. Kini, FDM telah menjadi metode 3D *printing* yang paling banyak diaplikasikan penggunaannya karena kemudahan, biaya operasional yang murah, dan ramah lingkungan. Keunggulan tersebut meningkatkan pengembangan berbagai macam purwarupa produk dan proses manufaktur dalam berbagai bidang industri untuk berbagai aplikasi.

Perkembangan pencetakan objek tiga dimensi tidak terlepas dari berkembangnya berbagai *software* desain yang memungkinkan untuk membuat objek tiga dimensi dan mencetaknya menggunakan mesin 3D *printer*. *Software* yang umum digunakan untuk mendesain objek tiga dimensi sebelum dicetak adalah *Solidwork* dan CAD Inventor. Aplikasi desain tersebut memungkinkan penggunaannya untuk membuat objek tiga dimensi dengan format tertentu kemudian mengubahnya dalam format *stereolithography* agar dapat di terapkan pada *software* pencetak objek tiga dimensi.

Di lain sisi, produk yang dihasilkan menggunakan metode 3D *printing* FDM lazimnya memiliki sifat mekanik yang tidak lebih baik jika dibandingkan dengan proses *injection moulding* karena terdapat titik lemah diantara lapis – lapisnya. Serta penyusutan yang dialami oleh material termoplastik ketika proses pendinginan.



Dalam proses riset dan penyempurnaan FDM, tentunya terdapat berbagai variabel dan berbagai macam parameter dengan tujuan menghasilkan objek tiga dimensi dengan hasil dan tingkat ketelitian mendekati desain aslinya serta dapat diaplikasikan seperti rancangan yang diharapkan. Variabel tersebut diantaranya adalah jenis *printer* yang digunakan, kapasitas dimensi objek yang akan dicetak, *software* pencetakan objek tiga dimensi, dan berbagai macam variasi *travel speed*, ketebalan, temperatur operasi, hingga jumlah lapisan untuk ketebalan yang telah ditentukan.

Selain pengaruh jenis *printer* pada metode FDM, material *filament* yang digunakan sebagai pengisi untuk mencetak objek tiga dimensi sudah tentu memiliki karakteristik sifat mekanik dan fisik yang berbeda, sehingga memungkinkan terjadinya perbedaan hasil objek untuk setiap material *filament* yang berbeda. Umumnya *filament* yang digunakan berasal dari material termoplastik jenis *Polylactic Acid* (PLA).

Kondisi berikutnya yang berpengaruh adalah desain internal geometri dan dimensi dari objek yang akan dicetak. 3D *printing* FDM bekerja dengan prinsip *layering* dengan proses *bottom up* ketika mencetak objek. Hal tersebut dapat memengaruhi kualitas objek hasil cetak tiga dimensi, mengingat setiap objek memiliki ukuran yang berbeda dan desain geometri dengan tingkat kesulitan tertentu.

Tomislav Galeta (2016), telah melakukan penelitian mengenai desain pengaruh internal geometri terhadap properti mekanik yang dihasilkan. Penelitian tersebut mengkomparasi sampel dengan geometri *stipes*, *circle*, dan *honeycomb*. Masih terdapat kekurangan dari penelitian ini, yaitu penggunaan jenis printer dan arah orientasi yang begitu banyak membuat variabel internal geometri yang akan diamati mendapat pengaruh dari orientasi pencetakan.

Dua tahun sebelumnya (2014), peneliti asal Jerman bernama Enno Ebel telah lebih dulu melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi internal geometri terhadap sifat mekanik sampel hasil cetak mesin 3D *Printer*. *Printer* yang



digunakan dalam penelitiannya adalah *printer* komersial yang umum dijual dipasaran. Namun, masih terdapat kekurangan dari penelitian tersebut, karena internal geometri yang di variasikan adalah bentuk garis dan *honeycomb* yang dibentuk dengan opsi dari parameter *infill geometri* objek yang akan dicetak, sehingga ukuran dan tebal objek tidak dapat di variasikan.

Berangkat dari kondisi tersebut maka penelitian yang lebih spesifik mengenai pengaruh internal geometri terhadap sifat mekanik material yang digunakan dalam mesin 3D *Printer* perlu dilakukan. Selain itu, pemilihan jenis printer komersial juga menjadi pilihan agar dapat mengetahui performa dan peluang aplikasinya dalam skala besar.

Penelitian ini akan menganalisis mengenai sifat mekanik objek hasil 3D *printing* FDM yang dipengaruhi oleh jenis material *filament*, desain internal geometri, dan rasio dimensinya. Data hasil penelitian nantinya diharapkan dapat dijadikan rujukan atau pertimbangan dalam membuat objek tiga dimensi menggunakan 3D *printing* FDM.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dibahas sebelumnya, rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana parameter 3D *Printer* yang sesuai untuk mencetak objek dengan variasi internal geometri menggunakan *filament polylactic acid*.
2. Bagaimana pengaruh internal geometri material *polylactic acid* (PLA) terhadap sifat mekanik yang dipreparasi menggunakan 3D *Printer*.
3. Bagaimana pengaruh rasio ketebalan terhadap ketinggian internal geometri material *polylactic acid* (PLA) terhadap sifat mekanik hasil 3D *Printing*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah digunakan untuk mengasumsikan



parameter yang pengaruhnya sangat kecil dan seragam pada penelitian sehingga dapat diabaikan. Adapun batasan masalah yang dimaksud adalah sebagai berikut:

1. Temperatur cetak diasumsikan sesuai dengan jenis *filament* yang digunakan.
2. *Layering* setiap spesimen dianggap sama untuk semua variabel.
3. Orientasi pencetakan semua sampel dianggap sama untuk setiap variabel.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Menganalisis parameter 3D *Printer* yang sesuai untuk mencetak objek dengan variasi internal geometri menggunakan *filament polylactic acid*.
2. Menganalisis pengaruh internal geometri material *polylactic acid* (PLA) terhadap sifat mekanik yang dipreparasi menggunakan 3D *Printer*.
3. Menganalisis pengaruh rasio ketebalan terhadap ketinggian internal geometri material *polylactic acid* (PLA) terhadap sifat mekanik hasil 3D *Printing*.

1.5 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menghasilkan objek tiga dimensi dengan sifat mekanik yang optimal menggunakan 3D *printing* FDM.
2. Dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian – penelitian berikutnya mengenai proses pencetakan objek tiga dimensi menggunakan 3D *printing* FDM.
3. Dapat diaplikasikan dalam bidang manufaktur skala industri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Rapid Prototyping*

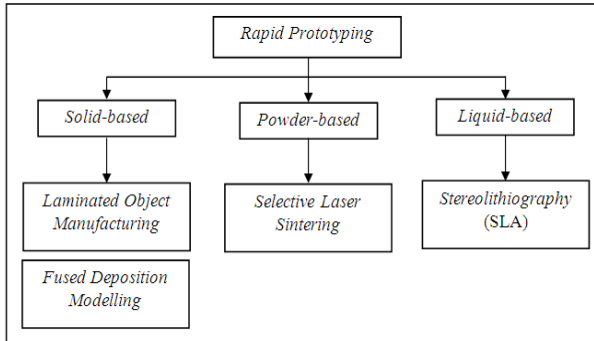
Rapid Prototyping (RP) merupakan proses manufaktur yang menghasilkan objek atau komponen dari *software computer aided design* (CAD). RP memungkinkan visualisasi suatu gambar tiga dimensi menjadi benda tiga dimensi asli dengan dimensi tertentu. Metode ini pertama kali pada tahun 1986 di California, USA dengan metode *stereolithography*. Setelah penemuan metode tersebut, berkembanglah berbagai metode lainnya yang memungkinkan pembuatan purwarupa dapat dilakukan secara cepat. Proses *rapid prototyping* diawali dengan mendesain model tiga dimensi menggunakan aplikasi *computer aided design*. Desain yang telah dibuat kemudian diorientasikan kepada ruang pembuatan. Konsep RP adalah dengan membagi benda dengan ketebalan yang sangat tipis sesuai dengan penampang dari objek tersebut. Kemudian, mesin *rapid prototyping* akan mencetak objek tiga dimensi dengan menambahkan material secara lapis demi lapis sesuai dengan *layering* yang telah di *setting* oleh aplikasi. Kualitas objek yang dihasilkan tergantung pada tebal lapisan dari mesin *rapid prototyping*. Semakin tipis setiap lapisan penyusunnya maka kualitas permukaan objek atau komponen yang dibuat akan semakin baik (O.S. Carneiro, 2015).

Fused Deposition Modelling (FDM) adalah salah satu metode RP dengan membuat purwarupa dengan proses pelelehan material termoplastik dengan menggunakan mekanisme ekstruder. Kemudian proses pembuatan objek melalui proses lapis demi lapis dengan prinsip *bottom up*.

Kini, FDM telah menjadi metode *3D printing* yang paling banyak diaplikasikan penggunaannya karena kemudahan, biaya operasional yang murah, dan ramah lingkungan. Keunggulan tersebut meningkatkan pengembangan berbagai macam purwarupa produk dan proses manufaktur dalam berbagai bidang industri untuk berbagai aplikasi. Gambar 2.1 menyajikan skema jenis *rapid*



prototyping berdasarkan jenis material yang digunakan pada proses cetak tiga dimensi.



Gambar 2.1 Jenis – jenis *rapid prototyping*
(O.S. Carneiro. 2015)

2.2 *Fused Deposition Modelling 3D Printing*

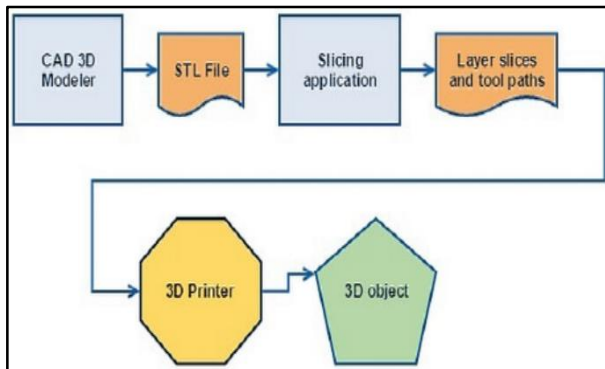
2.2.1. Teknologi 3D *Printing*

Teknologi ini sudah ada sejak lama. Metode *Fused Deposition Modelling 3D Printing* merupakan teknologi *rapid prototyping* yang dikembangkan oleh Stratasys menggunakan material termoplastik. Pengembangan terhadap teknologi ini terus dilakukan, sampai suatu perusahaan desain 3D berhasil menemukan sebuah material baru *nanocomposite* yang terdiri dari berbagai material plastik dan besi sampai saat ini bisa dirasakan. Saat ini, teknologi 3D *printing* mampu mengolah bahan yang bermacam – macam, dari bahan cair maupun padat (bahan cair akan dipadatkan terlebih dahulu), dan bahan – bahan tersebut telah mengandung warna, sehingga memungkinkan para kreator atau pengguna untuk berinovasi langsung sesuai dengan kreatifitasnya pada produk akhir. Dari segi harga, semenjak dimulainya abad ke 21 dimana telah berkembangnya teknologi secara besar, harga pasar untuk 3D *printer* ini meningkat. Tercatat oleh seorang konsultan, bahwa pada tahun 2012 harga ini meningkat sejumlah 29% dari tahun 2011 yaitu



sebesar 2,2 juta dolar. Meskipun begitu, dapat diperkirakan bahwa suatu saat teknologi ini akan menjadi konsumsi publik yang dapat dengan mudah ditemukan pada pasar, karena pada dasarnya teknologi ini dapat menekan biaya yang dikeluarkan masyarakat untuk membeli sejumlah barang rumah tangga tertentu, karena saat memiliki *printer* ini mereka dapat langsung menciptakan berbagai barang sesuai dengan keinginan dan kebutuhan mereka.

2.2.2. Prinsip Kerja Mesin 3D Printer



Gambar 2.2 Diagram alir proses 3D Printing
(Izabela Hager. 2016)

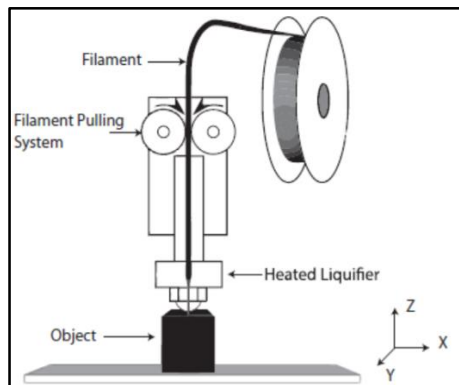
Secara umum, prinsip kerja mesin cetak tiga dimensi tidak jauh berbeda dengan *printer* pada umumnya. Ilustrasi proses cetak menggunakan 3D Printer disajikan pada gambar 2.2. Desain objek yang akan dibuat terlebih dahulu harus dikonversi ke dalam beberapa format *file* yang relevan dengan aplikasi yang digunakan. Desain awal objek menggunakan aplikasi CAD dengan format gambar *.dwg* atau langsung dikerjakan dalam aplikasi *inventor* maupun *SolidWork* atau aplikasi pemodelan lain yang relevan. Hasil desain kemudian disimpan dalam format *.stl* untuk membentuk lapisan – lapisan yang membentuk objek menggunakan aplikasi pencetakan tiga



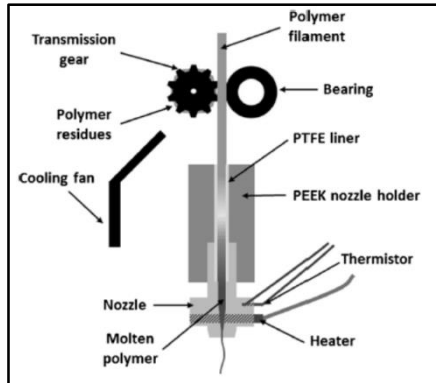
dimensi *Cura* (Izabela Hager. 2016).

Terdapat berbagai jenis mesin cetak tiga dimensi yang telah dijual umum dipasaran. Salah satunya adalah merk RepRap. Jenis – jenis mesin 3D *printer* yan berbeda tentunya menghasilkan hasil yang berbeda dengan setelan penggunaan yang berbeda pula.

Dalam penggunaannya, mesin 3D *printer* menggunakan input material berbentuk *filament* jenis polimer termoplastik. Terdapat dua jenis material *filament* yang paling umum digunakan yaitu *polylactic acid* (PLA) dan *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS) yang di ekstrusi dari *nozzle head*, dengan proses fabrikasi lapis demi lapis (*layer-by-layer*). *Filament* dilunakkan di dalam *liquifier* di atas temperatur *meltingnya* dan ditekan melalui *nozzle die*. Saat *liquifier* bergerak, polimer yang terekstrusi akan turun pada *bed* yang terdapat pada mesin pencetak kemudian *catridge* 3D *printer* yang meliputi komponen pada gambar 2.4 akan bergerak mengikuti pola dari desain yang akan dicetak (O.S. Carneiro. 2015). Gambar 2.3 adalah ilustrasi gambar dari proses FDM.

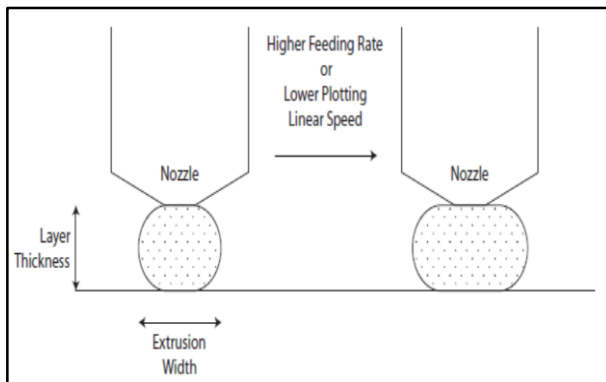


Gambar 2.3 Ilustrasi teknik FDM (O.S. Carneiro, 2015)



Gambar 2.4 Ilustrasi *nozzle head*
(O.S. Carneiro, 2015)

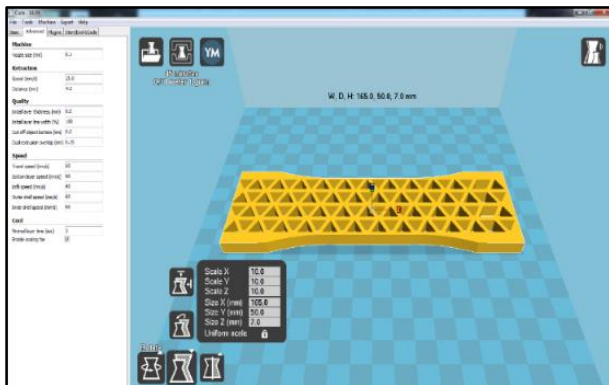
Meskipun terlihat mudah, terdapat model kontrol untuk mengatur semua parameter secara bersamaan. Parameter tersebut diantaranya : *filament feeding rate*, *extrusion width*, *linear speed*, dan *layer thickness*. Parameter – parameter tersebut merupakan kesatuan yang memengaruhi hasil pada proses FDM. Gambar 2.5 adalah ilustrasi dari parameter cetak *layer thickness* dan *extrusion width*.



Gambar 2.5 Ilustrasi parameter proses ekstrusi FDM
(O.S. Carneiro, 2015)

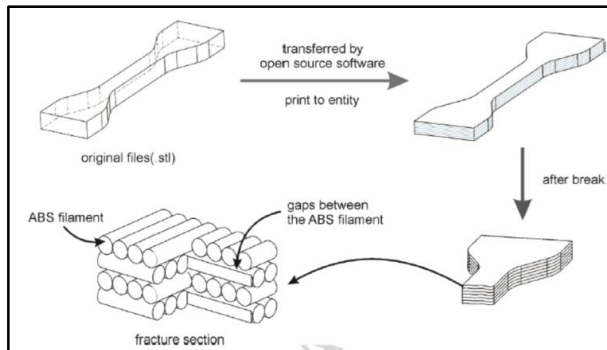


Parameter – parameter tersebut diatur menggunakan aplikasi pencetak objek tiga dimensi *Cura*. Terdapat berbagai panel opsi untuk mengatur kecepatan pencetakan hingga ketebalan atau jumlah lapisan objek yang akan dicetak. Gambar 2.5 menunjukkan ilustrasi pengaruh pengaturan lebar dan tebal *layer* terhadap *feeding rate* dan *linear speed* yang di butuhkan. Sebelum dicetak, pengaturan parameter – parameter tersebut diatur menggunakan aplikasi *Cura* seperti tampilan pada gambar 2.6, objek yang akan dicetak harus berada pada area kerja yang menggambarkan area *bed* 3D *printer*. Pilihan menu utama untuk mengatur kerja *printer* tersedia pada menu *basic* dan *advance* yang tersedia pada *toolbar* aplikasi *Cura*.



Gambar 2.6 Tampilan *software* Cura 14.09
untuk mencetak objek 3D

Selain menentukan besaran parameter – parameter pencetakan objek tiga dimensi, aplikasi *Cura* juga berfungsi sebagai *slicer* untuk menentukan jumlah *layers* dari objek berformat *.stl* yang akan dicetak. Gambar 2.7 menggambarkan *slicing* dari spesimen uji *tensile* yang di cetak menggunakan 3D *printer*.



Gambar 2.7 Ilustrasi *slicing* desain spesimen tensile
(Zixiang Weng. 2016)

Meskipun futuristik, prinsip *layer-by-layer* dapat memicu terjadinya kegagalan pada objek hasil cetak tiga dimensi. Beberapa bagian dari objek hasil 3D *printing* memiliki properti elastik yang lebih rendah dibandingkan dengan objek yang dibuat dengan cara *injection molding* dengan jenis polimer termoplastik yang sama. Beberapa penulis telah melakukan riset terhadap sifat mekanik terhadap objek hasil 3D *printing*. Salah satu fokus utamanya adalah agar memperoleh perbandingan hasil sifat mekanik objek yang dicetak menggunakan metode FDM konvensional dengan mesin 3D *printer* yang beredar dipasaran (Zixiang Weng. 2016).

2.3 Komposit

Komposit adalah kombinasi dari dua bahan atau lebih yang tersusun dengan fasa matrik dan penguat yang dipilih berdasarkan kombinasi sifat mekanik dan fisik masing – masing material penyusun untuk menghasilkan material baru dengan sifat yang unik dibandingkan sifat material dasar sebelum dicampur dan terjadi ikatan permukaan antara masing – masing material penyusun. Dengan adanya perbedaan sifat material penyusun dimana antar material harus terjadi ikatan yang kuat maka *wetting agent* perlu ditambahkan. Penyusun komposit terdiri dari matrik (penyusun



dengan fraksi volume terbesar), fiber sebagai penguat (penahan beban utama), interfasa (pelekat antar dua penyusun) dan *interface* (permukaan fasa yang berbatasan dengan fasa lain).

Berdasarkan definisi, komposit atau materi komposit merupakan suatu materi yang tersusun atas lebih dari dua elemen penyusunnya. Komposit bersifat heterogen dalam skala makroskopik. Bahan penyusun komposit tersebut masing – masing memiliki sifat yang berbeda, dan ketika digabungkan dalam komposisi tertentu terbentuk sifat – sifat baru yang disesuaikan dengan keinginan (Krevelen, 1994). Pada umumnya dalam proses pembuatannya melalui pencampuran yang homogen, sehingga kita leluasa merencanakan kekuatan material komposit yang kita inginkan dengan jalan mengatur komposisi dari material pembentuknya. Komposit merupakan gabungan antara bahan matriks atau pengikat dengan penguat (Mehta, 1986). Penguat adalah komponen yang dimasukkan ke dalam matriks yang berfungsi sebagai penerima atau penahan beban utama yang dialami oleh matriks. Sedangkan matriks adalah bagian dari komposit yang mengelilingi partikel penyusun komposit, yang berfungsi sebagai bahan pengikat partikel dan ikut membentuk struktur fisik komposit. Matriks tersebut bergabung bersama dengan bahan penyusun lainnya, oleh karena itu secara tidak langsung mempengaruhi sifat – sifat fisis dari komposit yang dihasilkan (Arnold dkk, 1992).

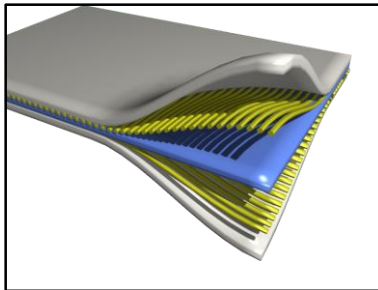
Bentuk (dimensi) dan struktur penyusun komposit akan mempengaruhi karakteristik komposit, begitu pula jika terjadi interaksi antara penyusun akan meningkatkan sifat dari komposit (Pramono, 2008). Material komposit terdiri dari lebih dari satu tipe material dan dirancang untuk mendapatkan kombinasi karakteristik terbaik dari setiap komponen penyusunnya. Dibanding dengan material konvensional, bahan komposit memiliki banyak keunggulan, diantaranya memiliki kekuatan yang dapat diatur, berat yang lebih ringan, kekuatan dan ketahanan yang lebih tinggi, tahan korosi, dan tahan keausan (Bishop dan Smallman, 2000).



Berdasarkan matriksnya, komposit dibagi menjadi:

1. *Metal matrix composites* (MMC) yaitu komposit yang menggunakan matriks logam.
2. *Ceramic matrix composites* (CMC) yaitu komposit yang menggunakan matriks keramik.
3. *Polymer matrix composites* (PMC) yaitu komposit yang menggunakan matriks polimer.

Manfaat utama dari penggunaan komposit adalah mendapatkan kombinasi sifat kekuatan serta kekakuan tinggi dan berat jenis yang ringan. Dengan memilih kombinasi material penguat dan matriks yang tepat, kita dapat membuat suatu material komposit dengan sifat yang tepat sama dengan kebutuhan sifat untuk suatu struktur tertentu dan tujuan tertentu pula (Feldman dan Hartomo, 1995). Gambar 2.8 adalah ilustrasi dari susunan material komposit.



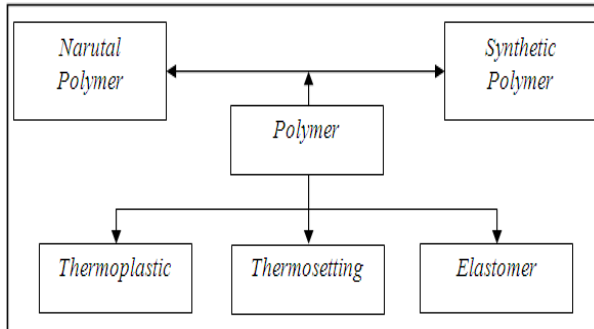
Gambar 2.8 Penyusun komposit (Haniffudin, 2016)

2.4 Polimer

Menurut Rahmat Saptono (2008) polimer adalah salah satu bahan rekayasa bukan logam (*non-metallic*) material yang penting. Saat ini bahan polimer telah banyak digunakan sebagai bahan substitusi untuk logam terutama karena sifat – sifatnya yang ringan, tahan korosi dan kimia, dan murah, khususnya untuk aplikasi – aplikasi pada temperatur rendah. Hal lain yang banyak menjadi pertimbangan adalah daya hantar listrik dan panas yang rendah, kemampuan untuk meredam kebisingan, warna dan tingkat transparansi yang bervariasi, serta kesesuaian desain dan



manufaktur. Pembagian polimer berdasarkan jenisnya ditampilkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Jenis – jenis polimer (Rahmat Saptono, 2008)

Polimer termoplastik, misalnya *polyethylene*, adalah jenis polimer yang memiliki sifat – sifat termoplastik yang disebabkan oleh struktur rantainya yang linear (*linear*), bercabang (*branched*) atau sedikit bersambung (*crosslinked*). Polimer dari jenis ini akan bersifat lunak dan viskos (*viscous*) pada saat dipanaskan dan menjadi keras dan kaku (*rigid*) pada saat didinginkan secara berulang - ulang. Polimer termoplastik memiliki sifat – sifat khusus sebagai berikut : berat molekul kecil, tidak tahan terhadap panas, jika dipanaskan akan melunak, jika didinginkan akan mengeras, mudah untuk diregangkan, fleksibel, titik leleh rendah, dapat dibentuk ulang (daur ulang), mudah larut dalam pelarut yang sesuai, dan memiliki struktur molekul linear atau bercabang. Sementara itu, polimer termoset (*thermosetting*), misalnya *bakelite*, hanya melebur pada saat pertama kali dipanaskan dan selanjutnya mengeras secara permanen pada saat didinginkan. Polimer jenis ini bersifat lebih keras dan kaku (*rigid*) karena strukturnya molekulnya yang membentuk jejaring tiga dimensi yang saling berhubungan (*network*). Polimer jenis elastomer, misalnya karet alam, memiliki daerah elastis non linear yang sangat besar yang disebabkan oleh adanya sambungan – sambungan antar rantai (*crosslinks*) yang

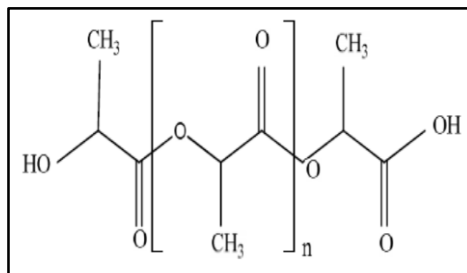


berfungsi sebagai 'pengingat bentuk' (*shape memory*) sehingga karet dapat kembali ke bentuknya semula, pada saat beban eksternal dihilangkan (Rahmat Saptono, 2008).

2.5 *Polylactic Acid*

Poli asam laktat atau *polylactic acid* (PLA) merupakan polimer *biodegradable* yang diperoleh dari dari asam laktat. PLA termasuk kedalam golongan poliester alifatik yang dapat terdegradasi maupun teruraikan di dalam tanah. PLA merupakan bahan serbaguna yang 100 % dibuat dari bahan baku yang dapat didaur ulang seperti jagung, gula, gandum, dan bahan – bahan yang memiliki pati dalam jumlah banyak (Koesnandar, 2004). PLA merupakan termoplastik *biodegradable* yang disusun oleh monomer – monomer asam laktat. Melalui polimerisasi asam laktat akan dibentuk PLA. PLA bersifat *biodegradable* karena memiliki beberapa gugus hidroksil pada ujung rantainya. Selain itu juga PLA bersifat biokompatibel artinya polimer ini dapat diterima dalam tubuh tanpa menimbulkan efek berbahaya.

PLA merupakan kristal polimer dan mempunyai sifat rapuh, sehingga dalam pembuatannya dibutuhkan *plasticizer* untuk menambah sifat mekanis PLA tersebut. Struktur PLA dapat dilihat pada Gambar 2.10 sementara sifat fisik dan mekanik PLA dapat dilihat pada tabel 2.2.



Gambar 2.10 Struktur poli asam laktat
(Rahmat Saptono, 2008)



Tabel 2.1 Properti *polylactic acid*

Properti		Standar	Kondisi	Satuan	PLA
Chemical Formula		-	-	-	(C ₃ H ₄ O ₂) _n
Density		ASTM D792	-	gr/cm ³	1,25
Melt Mass – Flow Rate		ASTM D1238	210°C/2.16kg	gr/10min	6,0 – 78
			220°C/10.0kg	gr/10min	-
Melting Point		ASTM D3418	-	°C	± 160
Printing Temperature		-	-	°C	± 190 – 210
Glass Transition Temperature		ASTM E1356	-	°C	60 – 65
Tensile Modulus		ASTM D638	Room Temperature	MPa	2020 – 3543
Tensile Strength	Yield	ASTM D638		MPa	61 – 66
	Break	ASTM D638		MPa	49 – 56
Tensile Elongation	Yield	ASTM D638		%	9,8 – 10
	Break	ASTM D638		%	0,5 – 9,2
Flexural Modulus		ASTM D790		MPa	2504 – 4000
Flexural Strength		ASTM D790		MPa	80 – 114
Compressive Strength		ASTM D695		MPa	18 – 94
Impact Notched (Izod)		ASTM D256		ft.lb/in	0,3 – 0,8

(MakeltFrom.com, 2016)

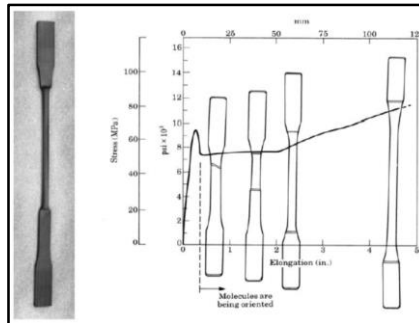
Metode yang umum digunakan untuk menghasilkan PLA adalah melalui reaksi polimerisasi pembukaan cincin (*Ring Opening Polymerization*) laktida. ROP berlangsung dengan menggunakan katalis dalam bentuk ion logam seperti seng, dibutil seng, timbal, timah(II) 2-etilheksanoat, timah(IV) halida, dan beberapa alkoksida logam lainnya (sebagian besar katalis dalam reaksi ROP ini bersifat toksik dan cukup berbahaya untuk aplikasi



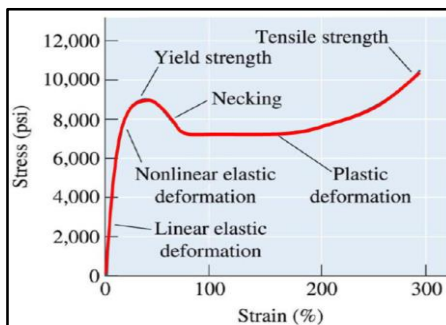
pangan serta medis) yang sangat diperlukan untuk memulai reaksi polimerisasi. Berdasarkan inisiator, reaksi ROP dapat berlangsung melalui beberapa mekanisme radikal bebas (Touminen, 2003).

2.6 Sifat Mekanik Polimer Termoplastik

Perilaku mekanik polimer termoplastik sebagai respon terhadap pembebanan secara umum dapat dijelaskan dengan mempelajari hubungan antara struktur rantai molekulnya dan fenomena yang teramati. Gambar 2.11 mengilustrasikan perilaku sampel uji tarik ketika mengalami pembebanan.



Gambar 2.11 Spesimen uji tarik dan perilaku polimer permoplastik pada umumnya (Rahmat Saptono, 2008)

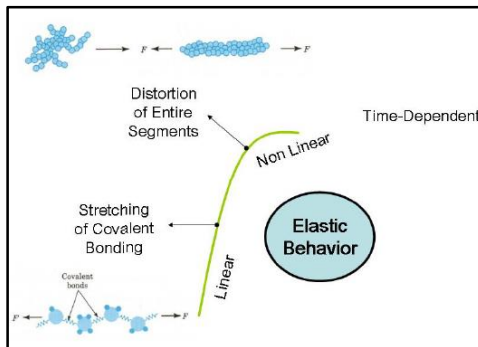


Gambar 2.12 Kurva tegangan regangan suatu polimer termoplastik (Rahmat Saptono, 2008)



Perilaku mekanik dari polimer termoplastik secara umum dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian, yaitu : (1) Perilaku Elastik, (2) Perilaku Plastik, (3) Perilaku Visko-Elastik.

Perilaku termoplastik secara umum adalah elastik non-linear yang tergantung pada waktu (*time dependent*). Hal ini dapat dijelaskan dari dua mekanisme yang terjadi pada daerah elastis, yaitu : (1) distorsi keseluruhan bagian yang mengalami deformasi, dan (2) regangan dan distorsi ikatan – ikatan kovalennya. Perilaku elastik non-*linear* atau non-proporsional pada daerah elastis terutama berhubungan dengan mekanisme distorsi dari keseluruhan rantai molekulnya yang *linear* atau *linear* dengan cabang (Rahmat Saptono, 2008). Gambar 2.12 menampilkan kurva tegangan regangan dari suatu material polimer termoplastik dengan keterangan titik – titik pada kurva. Kemudian gambar 2.13 menampilkan perilaku elastik dari polimer termoplastik.



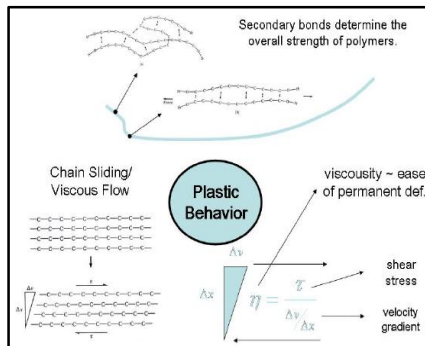
Gambar 2.13 Perilaku elastik polimer termoplastik
(Rahmat Saptono, 2008)

Perilaku plastis pada polimer termoplastik pada umumnya dapat dijelaskan dengan mekanisme gelinciran rantai (*chain sliding*). Ikatan sekunder sangat berperan dalam mekanisme ini sebagaimana diilustrasikan dalam gambar 2.14. Mula – mula akan terjadi pelurusan rantai *linear* molekul polimer yang keadaannya



dapat diilustrasikan seperti ‘mie’ dengan ikatan sekunder dan saling kunci mekanik. Selanjutnya akan terjadi gelinciran antar molekul yang telah lurus pada arah garis gaya. Ikatan sekunder dalam hal ini akan berperan sebagai semacam ‘tahanan’ dalam proses gelincir atau deformasi geser (*shear*) antar rantai molekul yang sejajar searah dengan arah garis gaya. Dengan demikian dapat dijelaskan bahwa ikatan sekunder sangat menentukan ketahanan polimer termoplastik terhadap deformasi plastik atau yang selama ini kita kenal dengan kekuatan (*strength*) dari polimer.

Gelinciran rantai molekul polimer termoplastik dapat pula dilihat sebagai aliran viskos dari suatu fluida. Kemudian molekul polimer untuk dideformasi secara permanen dalam hal ini berbanding lurus dengan viskositas dari polimer. Dari persamaan umum dapat dilihat bahwa tegangan geser akan menyebabkan *gradient* kecepatan antar rantai molekul yang dapat menyebabkan deformasi permanen tergantung pada viskositasnya.



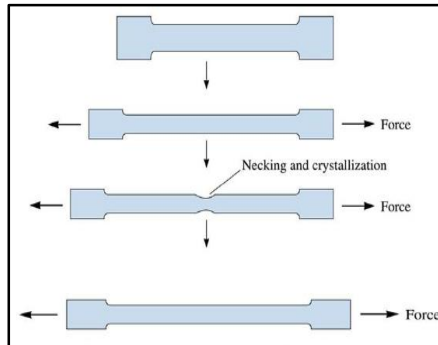
Gambar 2.14 Perilaku plastik polimer termoplastik
(Rahmat Saptono, 2008)

Perilaku penciutan (*necking*) dari polimer termoplastik *amorphous* pada gambar 2.15 agak sedikit berbeda dengan perilaku penciutan logam pada umumnya. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadi penciutan akan terjadi kristalisasi yang menyebabkan penguatan lokal pada daerah tersebut dan penurunan laju deformasi



(Rahmat Saptono, 2008). Rahmat Saptono (2008) menjelaskan bahwa visko-elastis berhubungan perilaku polimer termoplastik saat dideformasi yang terjadi dengan deformasi elastik dalam aliran viskos ketika beban diaplikasikan pada bahan. Hal ini berhubungan dengan ketergantungan perilaku bahan terhadap waktu pada saat deformasi elastis dan plastis.

Tidak seperti halnya logam, polimer umumnya tidak memiliki temperatur lebur yang spesifik. Namun, polimer biasanya mengalami perubahan sifat – sifat atau perilaku mekanik yang jelas pada rentang temperatur tertentu yang sangat sempit. Temperature dimana terjadi transisi temperatur tersebut dikenal sebagai temperature gelas, T_g (*Glass Temperature*). Pada temperatur gelas, termoplastik berubah keadaan dan perilakunya dari kaku, getas, padat, seperti gelas menjadi fleksibel, lunak, elastis, seperti fluida (visko-elastik). Besarnya titik gelas (T_g) tergantung pada struktur rantai molekul polimer yang umurnya sekitar $2/3$ dari titik leburnya.



Gambar 2.15 Penciutan polimer termoplastik *amorphous* pada pengujian tarik (Rahmat Saptono, 2008)

2.7 Penelitian Sebelumnya

2.2.1. *Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects*



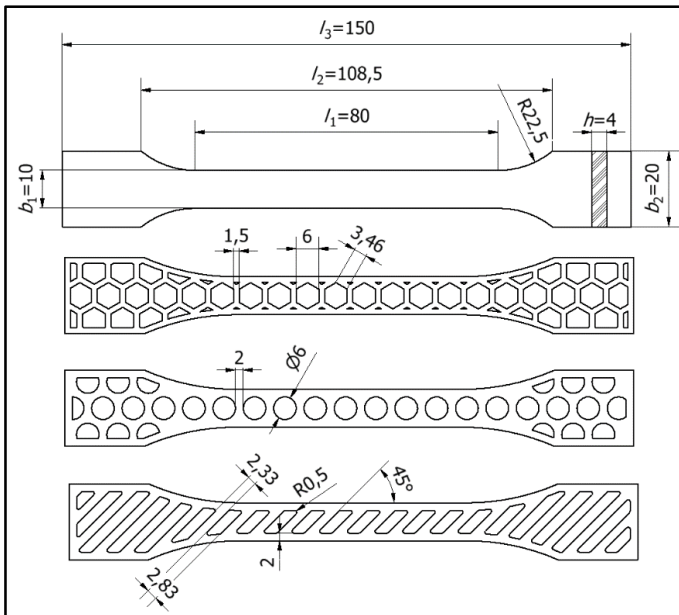
Peneliti bernama Tomislav Galeta (2016) melakukan riset terhadap kekuatan mekanik material *powder* zp130 yang merupakan campuran antara plaster, *vinyl polymer*, dan *sulphate salt*. Mesin cetak tiga dimensi yang digunakan berjenis Z310 yang merupakan jenis mesin cetak tiga dimensi *monochromatic* dengan skala cetak objek kecil hingga sedang. Sampel yang digunakan merujuk pada sampel uji tarik ISO 527:2012. Dimensi dan internal geometri sampel ditampilkan pada gambar 2.16. Tidak hanya variasi geometri, Galeta juga memvariasikan orientasi atau arah pencetakan dari setiap sampel terhadap koordinat sumbu X dan Y. Tabel 2.2 menampilkan variasi orientasi dari setiap variabel. Dari ketiga variasi struktur terbagi lagi menjadi empat variabel berdasarkan pada orientasi pencetakan.

Tabel 2.2 Kombinasi dari faktor proses dan *experiment labels*
(Tomislav Galeta, 2016)

Structure	Honeycomb (H)				Drills (D)				Stripes (S)				Full (F)	
Orientati on	X		Y		X		Y		X		Y		Y	
Base	W	H	W	H	W	H	W	H	W	H	W	H	W	
Expe rime nt label	H	H	H	H	D	D	D	D	S	S	S	S	FYW	
	X	X	Y	Y	X	X	Y	Y	X	X	Y	Y		
	W	H	W	H	W	H	W	H	W	H	W	H		

Pendekatan metode elemen hingga menggunakan *software* Inventor juga digunakan dalam penelitian ini. Simulasi uji tarik dilakukan untuk memprediksi kemungkinan lokasi atau area yang mengalami *crack*.

Berdasarkan hasil penelitian diperoleh simpulan bahwa internal geometri *honeycomb* memiliki kekuatan tarik yang lebih baik dibandingkan dengan kedua variabel internal geometri lainnya dan sampel kontrol.



Gambar 2.16 Tipe internal geometri sampel dan dimensi (full, honeycomb, drill, stripes) (Tomislav Galeta, 2016)

2.2.2. Mechanical Behaviour of ABS: An Experimental Study using FDM and Injection Moulding Techniques

Paper milik Michael Dawoud dari Mechanical Design and Production Engineering Department, Ain Shams University, membandingkan sifat mekanik dari material ABS yang dipreparasi menggunakan teknik FDM 3D *Printing* dan *injection moulding*. Printer yang digunakan adalah tipe *Stratasys*. Parameter mesin dijabarkan dalam tabel 2.3 dan tabel 2.4.

Properti mekanik dari material ABS yang dipreparasi menggunakan *injection moulding* mnghasilkan properti yang lebih baik dibandingkan FDM 3D *Printing*. Hal ini disebabkan karena pada proses *injection moulding*, material terkompaksi dengan baik sehingga menaikkan *crystalline structure* yang meningkatkan *mechanical strength*. Hasil pengujian



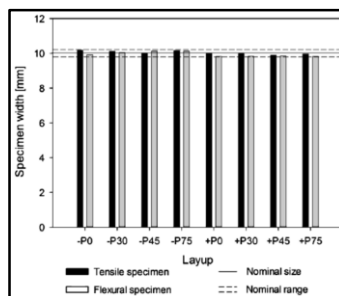
menunjukkan nilai kekuatan *flexural* dan *tensile* dari kedua metode menghasilkan selisih nilai yang tidak begitu jauh. Akurasi dimensi spesimen yang dicetak menggunakan FDM 3D *Printing* menghasilkan dimensi dengan deviasi yang masih dalam *range* toleransinya. Data tersebut disajikan dalam grafik pada gambar 2.17 dan 2.18. Diperoleh hasil kekuatan tarik menggunakan *injection moulding* sebesar 36,8 MPa dan FDM 3D *Printing* sebesar 34,2 MPa (Michael Dawoud, 2016).

Tabel 2.3 Parameter 3D *Printer stratasy*
(Michael Dawoud, 2016)

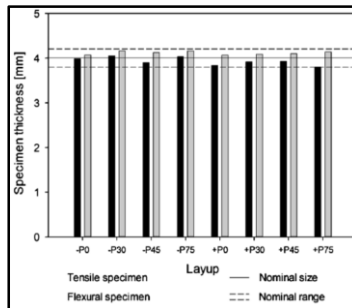
Parameter	Value
Nozzle diameter	1 mm
Layer height	0.5 mm
No. of contours	1
Printing speed	30 mm/s
Nozzle temperature	250 °C ± 5
Bed temperature	120 °C

Tabel 2.4 Parameter *injection moulding*
(Michael Dawoud, 2016)

Parameter	Value
Screw speed	180 rpm
Injection pressure	90 kg/cm ²
Clamping pressure	105 kg/cm ²
Holding time	35 s



Gambar 2.17 Lebar spesimen hasil 3D *Printer*
(Michael Dawoud, 2016)



Gambar 2.18 Tebal spesimen hasil 3D Printer
(Michael Dawoud, 2016)

2.2.3. Fused Deposition Modeling with Polypropylene

Setahun sebelumnya (2015), O.S. Carneiro dari Institute for Polymers and Composites, Polymer Engineering Department, University of Minho melakukan penelitian mengenai kemungkinan material termoplasik pengganti untuk 3D Printer. Material yang digunakan adalah polipropilen (PP). Pelet PP dibentuk menjadi *filament* 3D Printer menggunakan mesin ekstrusi. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan preparasi objek menggunakan 3D Printer dan *compression molding*. Parameter pencetakan yang diteliti diantaranya adalah efek orientasi cetak, efek *layer thickness*, dan efek *infill*.

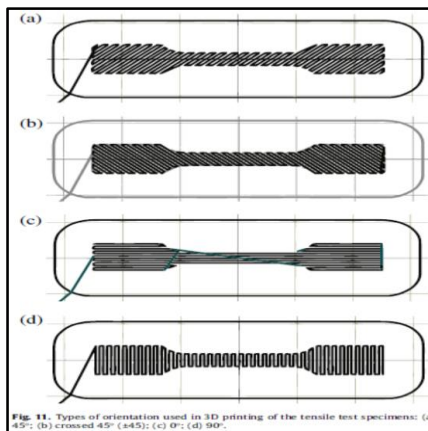
Pengaruh orientasi cetak seperti pada tabel 2.5 Diperoleh hasil cetak terbaik pada pencetakan dengan orientasi 0° seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.19. Sedangkan pengaruh tebal layer diperoleh hasil dengan kekuatan terbaik adalah layer dengan tebal 0.35mm (O.S. Carneiro, 2015).

Selain itu, secara umum diperoleh simpulan bahwa (i) orientasi cetak memengaruhi kekakuan objek cetak; (ii) tebal *layer* memengaruhi performa mekanik dari sampel uji; (iii) persentase *infill* berdampak pada properti mekanik; (iv) perbedaan performa sampel hasil cetak menggunakan 3D Printer sebesar 20 – 30 % dibandingkan dengan *compression molding*.



Tabel 2.5 Parameter 3D *Printer*
(O.S. Carneiro, 2015)

Parameter	Value
Infill degree (%)	20, 60 and 100
Orientation ^a (°)	45, 0, 90, crossed 45 (± 45) and crossed 0–90
Layer thickness, t (mm)	0.20 and 0.35



Gambar 2.19 Orientasi pencetakan spesimen 3D *Printer*
(O.S. Carneiro, 2015)



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan Penelitian

1. *Filament* PLA diameter 1.75mm, warna putih tulang.
Filament PLA pada gambar 3.1 digunakan sebagai *feeding material* pada proses pencetakan objek tiga dimensi.



Gambar 3.1 *Filament polylactic acid*

2. Alkohol 96%
Pelarut Alkohol digunakan untuk membersihkan sisa hasil pencetakan objek di *bed printer*.

3.2 Peralatan dan Pengujian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Komputer dengan *software* Cura
Digunakan untuk mengatur setelan objek sebelum dicetak.
2. 3D *printer* Prusa i3
Alat cetak ini digunakan untuk mencetak objek tiga dimensi dengan material PLA (gambar 3.2).
3. Jangka Sorong dan mistar
Digunakan untuk mengukur akurasi dimensi objek hasil cetakan dengan desain objek pada komputer.
4. Neraca digital
Neraca digital merk Mettler Toledo digunakan untuk menghitung massa dari seluruh sampel pengujian.



5. *3-point bending*

Instrument ini digunakan untuk mengetahui nilai kekuatan fleksural dan modulus fleksural dari objek yang dicetak menggunakan PLA sesuai dengan ASTM D790.

6. *Tensile test*

Pengujian tarik dengan standar ASTM D638 dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik objek uji. Pengujian tarik dan bending dilakukan di laboratorium pengujian bahan Universitas Airlangga. Menggunakan mesin Shimadzu AG-10TE dengan kapasitas *load* 100 kN.

7. *Fourier Transform InfraRed* (FTIR)

Pengujian ini dilakukan untuk mengarakterisasi jenis *filament* material yang digunakan untuk mencetak objek menggunakan mesin 3D *Printer* berdasarkan gugus fungsi yang dideteksi oleh mesin FTIR. Pengujian FTIR dilaksanakan di laboratorium Karakterisasi Material, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

8. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian ini dilakukan untuk mengamati morfologi patahan dari sampel uji tarik dan bending hasil proses cetak menggunakan 3D *Printer*. Pengujian SEM dilaksanakan di laboratorium Karakterisasi Material, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

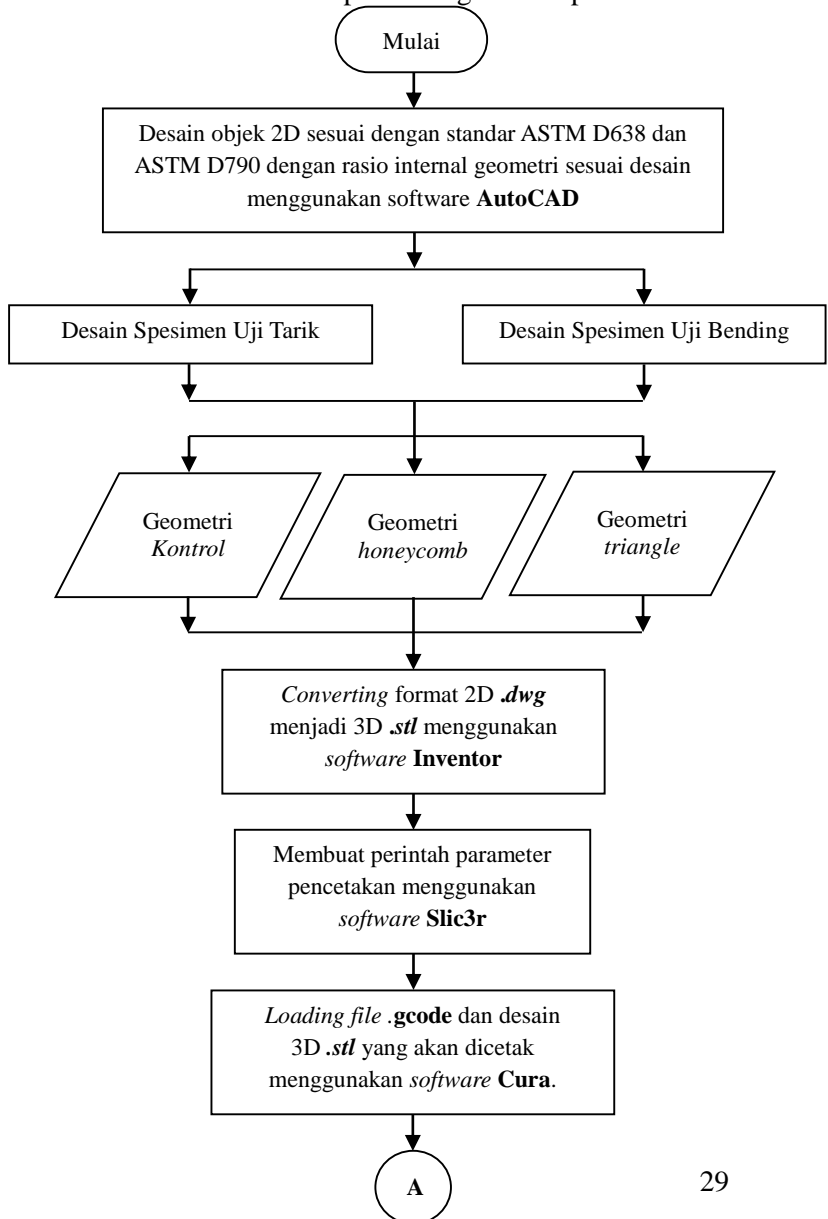


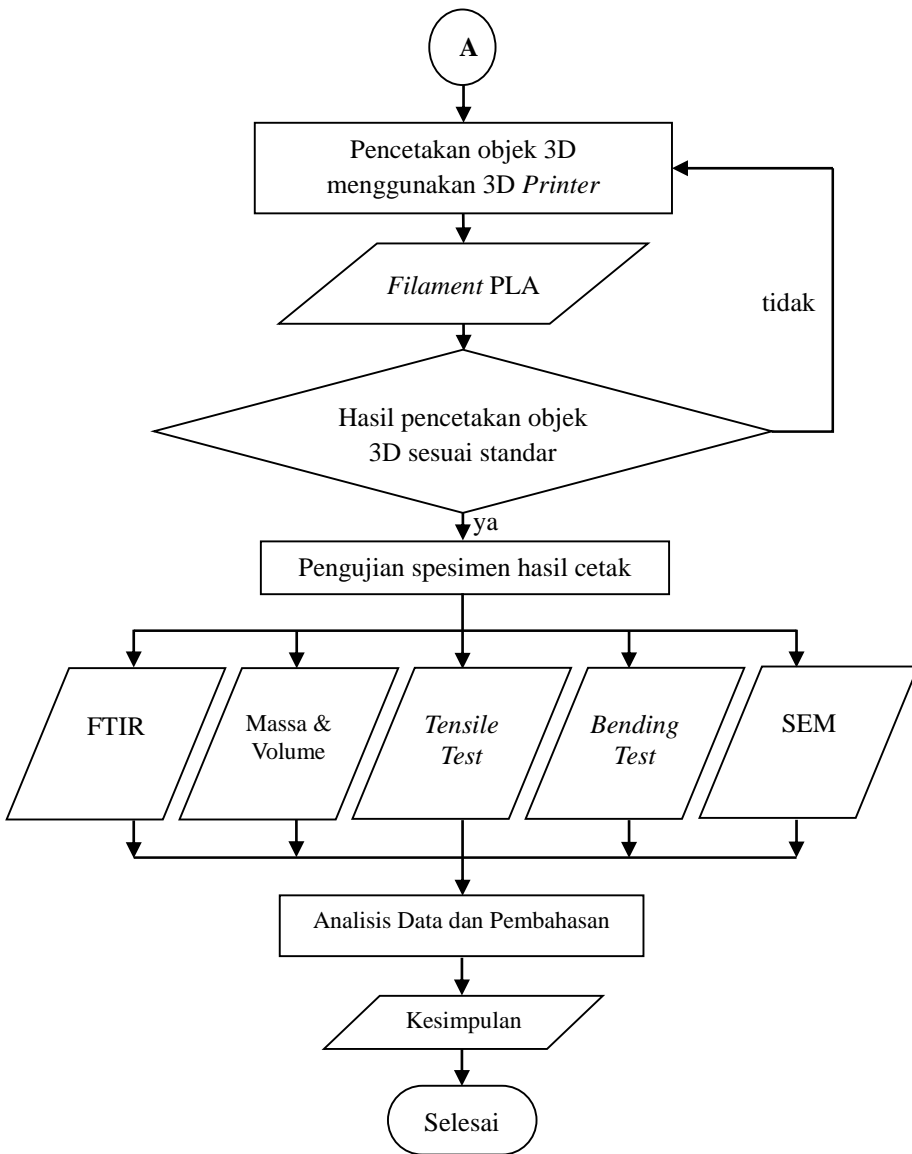
Gambar 3.2 *Printer* Prusa i3



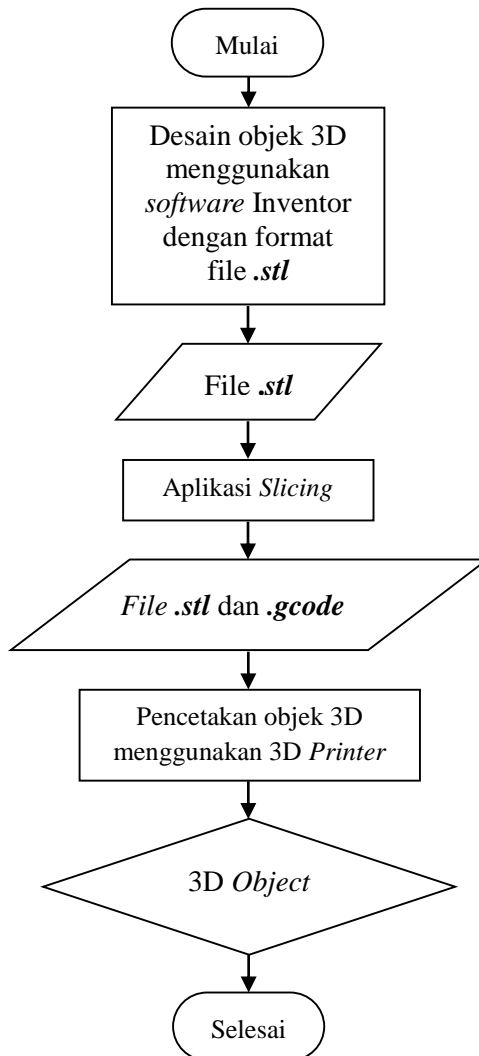
3.3 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.3 dan 3.4 merupakan diagram alir penelitian.





Gambar 3.3 Diagram alir penelitian



Gambar 3.4 Diagram alir proses 3D *Printing*



3.4 Prosedur Penelitian

Berdasarkan diagram alir penelitian pada Gambar 3.3, tahapan – tahapan dalam penelitian akan dijelaskan sebagai berikut.

1. Desain 3D spesimen
Objek yang nantinya akan dicetak terlebih dahulu digambar desain dua dimensinya menggunakan aplikasi AutoCAD dengan ukuran yang sesuai dengan standar ASTM D638 untuk pengujian tarik dan ASTM D790 untuk uji bending. Luaran objek dua dimensi berformat *.dwg* atau *drawing* yang akan dipindahkan ke *software* inventor untuk di *extrude* kemudian disimpan dalam format *.stl*.
2. Simulasi tegangan menggunakan *software* Inventor
Desain tiga dimensi yang tersimpan pada aplikasi Inventor kemudian disimulasikan menggunakan menu *stress analysis* dengan parameter yang mendekati pengujian sesungguhnya.
3. *Slicing layers* dan *printing preparation*
Objek tiga dimensi dengan ukuran yang telah ditentukan pada proses sebelumnya kemudian di buka menggunakan *software* Cura. Secara otomatis jumlah lapisan dari objek tiga dimensi yang akan dicetak dapat diketahui jumlahnya dan dapat ditentukan jumlahnya dengan mengatur ketebalan dari setiap lapisannya.
4. Pencetakan 3D
Setelan dari objek yang telah valid pad *software* Cura kemudian dicetak menggunakan 3D *Printer* dengan panjang dan massa *filament* serta durasi yang telah diatur menggunakan *software* Cura.
5. Perhitungan massa dan volume sampel
Seluruh sampel yang telah dicetak selanjutnya akan di timbang massanya menggunakan neraca digital Mettler Toledo dengan ketelitian decimal empat angka belakang koma.



6. Pengujian mekanik dan morfologi
Hasil cetak objek tiga dimensi yang telah berbentuk spesimen uji tarik dan uji fleksural kemudian dilakukan pengujian mekanik dengan standar ASTM D638 dan ASTM D790.
Sampel hasil uji mekanik kemudian di preparasi lagi untuk diuji menggunakan *Scanning Elcetron Microscope* (SEM). Uji SEM dilakukan untuk mengamati morfologi pada area sampel yang patah.

3.5 Rancangan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah pada bab sebelumnya, rancangan penelitan disajikan dalam tabel 3.1 hingga 3.3. Variabel yang digunakan untuk pengujian tarik dan pengujian bending merujuk pada standar ASTM dengan jumlah sampel setiap variabel adalah tiga buah.

Tabel 3.1 Rasio panjang internal geometri spesimen penelitian

<i>Filament :</i>	PLA	
Internal Geometri		
Kontrol	<i>Triangle</i>	<i>Honeycomb</i>
Rasio Panjang Internal Geometri		
Solid	4,5 mm	4,5 mm
	9,0 mm	9,0 mm

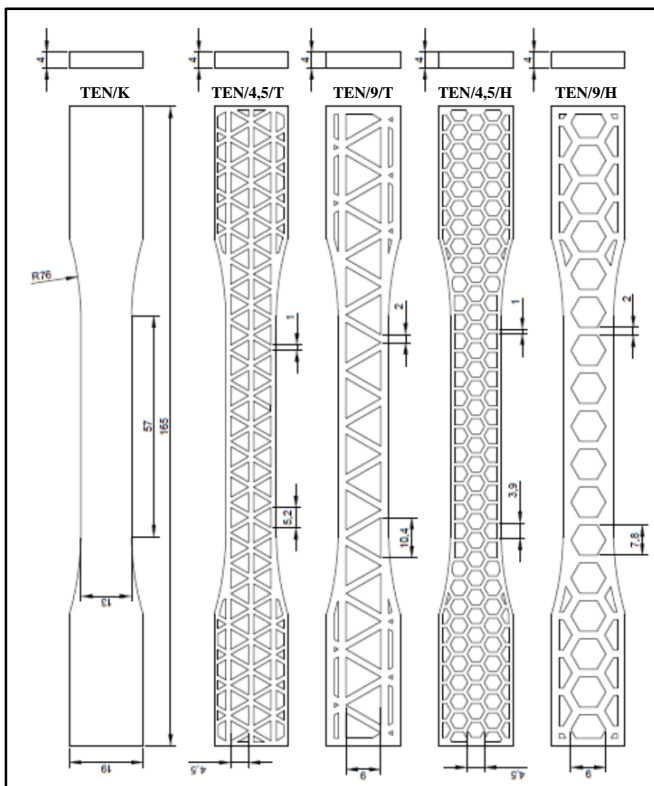
Tabel 3.2 Kode spesimen uji tarik

<i>Tensile Test</i>				
Rasio Panjang Internal Geometri Spesimen				
4.5 mm		9.0 mm		Solid
Internal Geometri				
<i>Honeycomb</i>	<i>Triangle</i>	<i>Honeycomb</i>	<i>Triangle</i>	Kontrol
Kode Pengujian				
TEN/4,5/H	TEN/4,5/T	TEN/9/H	TEN/9/T	TEN/K

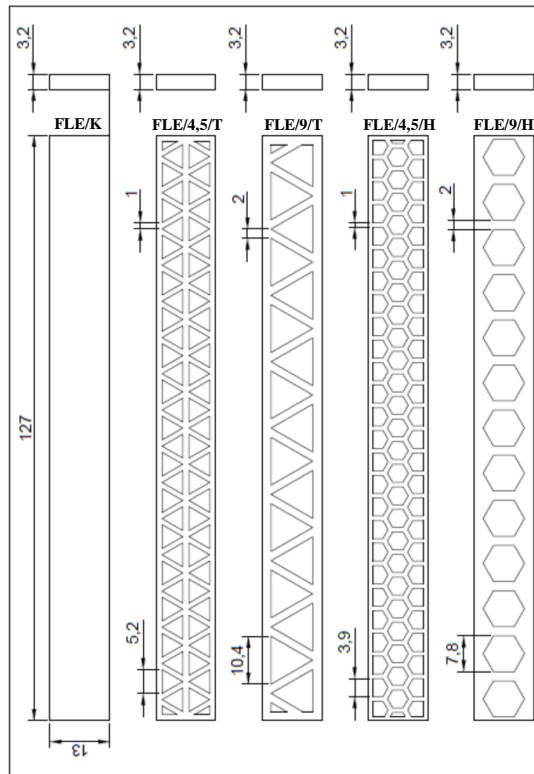


Tabel 3.3 Kode spesimen uji bending

Flexural Test				
Rasio Panjang Internal Geometri Spesimen				
4.5 mm		9.0 mm		Solid
Internal Geometri				
Honeycomb	Triangle	Honeycomb	Triangle	Kontrol
Kode Pengujian				
FLE/4,5/H	FLE/4,5/T	FLE/9/H	FLE/9/T	FLE/K



Gambar 3.5 Desain internal geometri dan dimensi (mm) spesimen uji tarik



Gambar 3.6 Desain internal geometri dan dimensi (mm)
spesimen uji bending



Laporan Tugas Akhir
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Proses pencetakan sampel menggunakan mesin 3D *Printer* dan pengujian mekanik sampel hasil cetak telah dilakukan. Pengujian mekanik terdiri dari uji tarik dan uji bending. Sedangkan pengujian FTIR pada *filament printer* dilakukan untuk memverifikasi bahwa material yang digunakan sebagai *filament* benar *Polylactic Acid* (PLA).

Agar memudahkan proses identifikasi, sampel diberi ciri menggunakan kode dengan urutan nama : jenis pengujian, ukuran internal geometri, dan bentuk internal geometri. Sebagai contoh, FLE/4,5/T artinya sampel untuk uji bending (*flexural*) dengan diameter sumbu simetri internal geometri 4,5 mm dan bentuk struktur *triangle*.

4.1 Analisis parameter pencetakan *filament polylactic acid*

Proses pencetakan objek tiga dimensi menggunakan 3D *Printer* diawali dengan proses desain menggunakan aplikasi desain Inventor. Desain dari aplikasi Inventor nantinya adalah objek tiga dimensi dengan ekstensi *file .stl* atau dokumen *stereolithography*. *File .stl* kemudian diverifikasi dan diberi input data parameter jenis material, temperatur *nozzle* dan *bed*, serta ukuran *nozzle* pada aplikasi Repetier Host atau Slic3r. Luaran dari aplikasi ini adalah desain objek tiga dimensi *.stl* yang telah terverifikasi dan memiliki parameter dasar pencetakan berupa data dalam *file .gcode*.

File .stl dan *.gcode* nantinya dibuka menggunakan aplikasi cetak tiga dimensi Cura dengan versi 14.09 dan kembali diinputkan parameter cetak pada pilihan sub *menu* dengan rincian parameter yang telah ditentukan. Setelah objek siap cetak, terlebih dahulu dilakukan *preheat* pada *nozzle head* dan *bed printer* agar ketika telah selesai mengatur parameter cetak, mesin cetak 3D telah siap digunakan untuk proses mencetak objek tiga dimensi.

Filament PLA yang telah *melting* akan diekstrusi dari *nozzle head* dengan proses fabrikasi *layer by layer*. *Filament*



dilunakkan di dalam *liquifier* di atas temperatur *meltingnya* dan ditekan melalui *nozzle die*. Saat *liquifier* bergerak, polimer yang terekstrusi akan turun pada *bed* yang terdapat pada mesin pencetak, kemudian *catridge 3D Printer* mengikuti pola dari desain yang akan dicetak.

Tabel 4.1 Parameter pencetakan menu basic
pada aplikasi Cura 14.09

Basic			
Sub Menu	Parameter	Units	Value
Quality	Layer Height	mm	0.1
	Shell Thickness	mm	0.6
	Enable Retraction		V
Fill	Bottom/Top Thickness	mm	0.8
	Fill Density	%	100
Speed & Temperature	Print Speed	mm/s	30
	Printing Temperature	C	190
	Bed Temperature	C	60
Support	Support Type		x
	Platform Adhesion Type		Raft
Filament	Diameter	mm	1.75
	Flow	%	100

Pemilihan parameter pencetakan dilakukan dengan cara mencetak sampel uji dalam berbagai opsi parameter pada *menu basic* dan *advance* pada aplikasi cetak 3D Cura. Sampel hasil cetak kemudian diamati secara visual dan dibandingkan hasilnya. Tabel 4.1 dan tabel 4.2 menampilkan hasil parameter cetak pada *menu basic* dan *advance* aplikasi Cura.

Beberapa faktor utama penentu kualitas objek hasil cetak adalah *layer height*, *shell thickness*, dan *retraction*. *Layer height* adalah ketinggian dari lapisan penyusun setiap objek, nominalnya adalah 0,1 mm. Artinya jika tebal sampel uji tarik adalah 4 mm, maka ada 40 *layer* penyusun sampel tersebut.

Kemudian adalah sub menu fill yang terdiri dari *bottom/top thickness* serta *fill density*. *Fill density* adalah nominal persentase



material pada setiap lapisan penyusun objek. Input 100 % artinya setiap *layer* tersusun dari 100 % *molten* PLA yang terekstrusi dari *nozzle head printer*.

Sub *menu speed* dan *temperature* adalah pilihan kecepatan pencetakan objek dan temperatur *melting* dari material PLA. *Bed* temperatur adalah pengaturan temperatur pada meja tempat objek dicetak. Nominalnya adalah nominal temperatur transisi gelas dari material PLA.

Kemudian *support platform* dengan tipe *raft* adalah lapisan tipis bagian dasar sebagai pondasi untuk merekatkan objek pada *bed printer*. *Filament* PLA yang digunakan berdiameter 1,75 mm dengan *flow* material ketika proses pencetakan adalah 100 %.

Tabel 4.2 Parameter pencetakan menu advance
pada aplikasi Cura 14.09

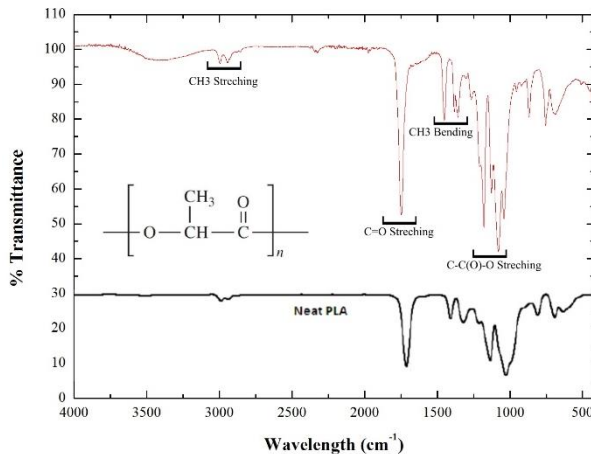
Advance			
Sub Menu	Parameter	Units	Value
Machine	Nozzle Size	mm	0.4
Retraction	Speed	mm/s	25
	Distance	mm	1
Quality	Initial Layer Thickness	mm	0.3
	Initial Layer Line Width	%	100
	Cut off Object bottom	mm	0.0
Speed	Travel Speed	mm/s	130
	Bottom Layer Speed	mm/s	20
	Infill Speed	mm/s	60
	Outer Shell Speed	mm/s	20
	Inner Shell Speed	mm/s	0.0
Cool	Minimal Layer per time	sec	5
	Enable Cooling Fan		V

Tabel 4.2 menampilkan parameter pencetakan *menu advance* untuk material PLA. *Menu advance* adalah pelengkap *menu basic* dengan tambahan opsi untuk pengaturan ukuran *nozzle*, *retraction* atau penarikan *filament* dari *spool* ke *extrusion chamber*, dan kipas pendingin untuk motor penarik *filament* serta



heater block. Parameter – parameter tersebut bukanlah pilihan absolut, melainkan dapat dikombinasikan bergantung pada jenis material, jenis *printer*, dan geometri objek yang dicetak (Michael Dawoud, 2016).

4.2 Analisis pengujian FTIR *filament polylactic acid*



Gambar 4.1 Spektrum infra merah *polylactic acid*

Pengujian spektrum infra merah pada *filament* PLA yang digunakan untuk mencetak sampel uji bertujuan untuk memverifikasi komposisi gugus penyusun material PLA. Gambar 4.1 menampilkan grafik FTIR dari *Neat* PLA, *filament* PLA, dan struktur kimia dari PLA yang digunakan pada proses pencetakan sampel. Grafik FTIR dari *Neat* PLA di atas diperoleh dari rujukan penelitian milik Giita silverajah (2012).

Dari hasil pengujian dapat diidentifikasi adanya peregangan gugus CH₃ dengan puncak gelombang pada 3000 – 2900 cm⁻¹. Sementara peregangan ikatan rangkap antara C dengan O berada pada 1761 cm⁻¹ dan O-C=O mengalami peregangan pada puncak gelombang 1190 – 1090 cm⁻¹. Kemudian ikatan CH₃ pada



puncak gelombang 1500 -1250 cm⁻¹. Hasil tersebut bersesuaian dengan data *neat* PLA dari referensi.

4.3 Analisis pengujian tarik

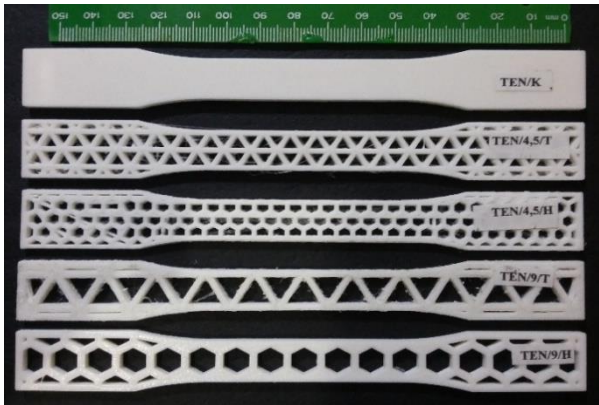
Sampel uji tarik dibentuk sesuai dengan standar ASTM D638 tipe I dengan nominal ketebalan setiap sampel $4 \pm 0,4$ mm dan *speed of testing* 5 mm/min. Pengujian tarik dilaksanakan di laboratorium pengujian bahan Universitas Airlangga menggunakan mesin Shimadzu AG-10TE dengan kapasitas *load* 100 kN.

Pengujian tarik dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sifat mekanis dari bahan polimer terhadap tarikan dimana sifat mekanis tersebut antara lain mengetahui titik tarik maksimum, titik putus, dan karakter *polylactic acid* (Qolik, 1991).

Data hasil pengujian yang diperoleh berupa nominal *load* ketika mencapai *ultimate tensile stress* dan *strain* maksimum ketika sampel putus. Nilai kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile stress*), adalah beban maksimum (P) dibagi luas awal penampang lintang (A_o) benda uji (George E. Dieter, 2012). Gambar 4.2 adalah foto sampel uji tarik hasil cetak menggunakan 3D Printer.

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \dots \dots \dots (4. 1)$$

Luas penampang lintang (*cross section area*) dari masing – masing sampel dihitung dari luasan penampang lintang sampel kontrol dikurangi dengan luasan internal geometri dari masing – masing variabel sampel. Luas penampang lintang sampel TEN/K adalah 52 mm². Diperoleh dari hasil kali tebal ($t = 4$ mm) sampel dengan lebar ($l = 13$ mm) sampel. Sedangkan luas penampang lintang untuk sampel TEN/4,5/T, TEN/9/T, TEN/4,5/H, dan TEN/9/H adalah 16 mm². Nominal tersebut adalah nilai minimum *cross section area* sebagai pembagi dari *breaking force* yang dihasilkan ketika sampel putus (Tomislav Galeta, 2016).



Gambar 4. 2 Sampel uji tarik

Nilai regangan setiap sampel diperoleh dari hasil bagi perpanjangan panjang ukur (ΔL) benda uji dengan panjang awal (L_0) (George E. Dieter, 1976). Nilai panjang ukur (*gage length*) yang digunakan adalah 57 mm.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots \dots \dots (4.2)$$

TEN/K atau sampel kontrol dibuat dengan tujuan untuk mengetahui kualitas sampel hasil cetak menggunakan mesin 3D *Printer*, sekaligus menjadi variabel kontrol untuk pembanding sampel dengan variasi internal geometri (O.S. Carneiro, 2015). Data hasil pengujian untuk sampel kontrol disajikan dalam tabel 4.3.

Tabel 4.3 *Ultimate tensile strength* PLA

Sampel	Filament PLA Botfeeder (lampiran)	TEN/K
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	49 - 56	50,9191

Nilai *ultimate tensile strength* data pada tabel di atas sesuai dengan ASTM D638 dengan parameter pengujian yang sama. Sampel referensi yang diperoleh dari referensi *datasheet filament*

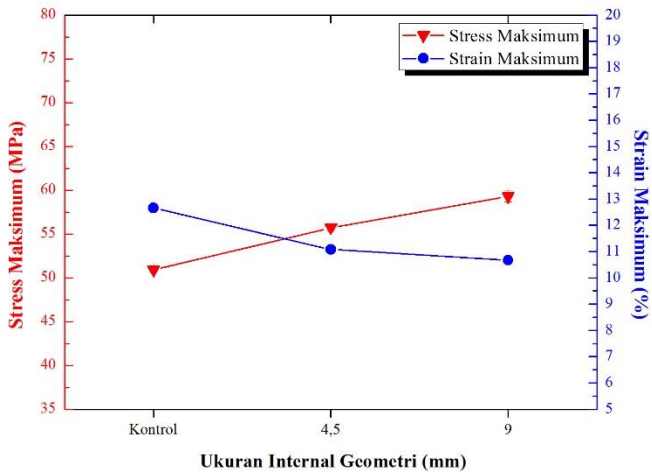


PLA berkisar pada rentang 49 – 56 MPa (BotFeeder.com, 2016). Sedangkan nilai kekuatan tarik maksimum sampel yang dipreparasi menggunakan mesin 3D *Printer* adalah 50,9191 MPa. Besaran nilai kekuatan tarik maksimum dari pengujian tarik tersebut bisa saja lebih tinggi atau lebih rendah, bergantung pada paramater pencetakan menggunakan mesin 3D *Printer*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pilihan parameter pencetakan menggunakan mesin 3D *Printer* telah sesuai (O.S. Carneiro, 2015).

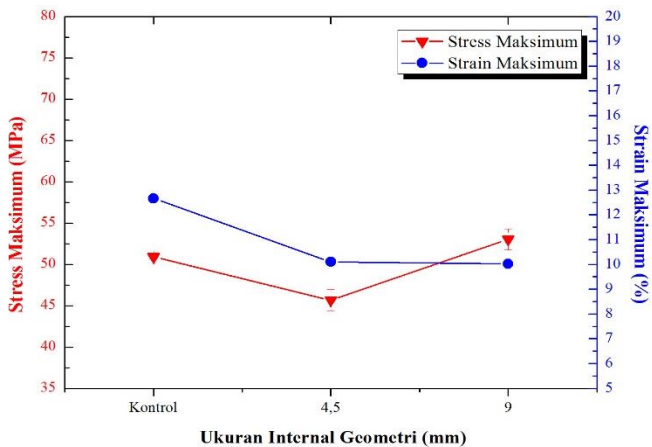
Hasil pengujian kemudian dibandingkan berdasarkan jenis dan ukuran dari setiap internal geometri. Gambar 4.3 menyajikan data hasil pengujian tarik untuk internal geometri segitiga.

Grafik pada gambar 4.3 menyajikan nilai *stress* dan *strain* maksimum ketika sampel dengan internal geometri segitiga (*triangle*) mengalami putus. Nilai kekuatan tarik maksimum dari sampel TEN/K, TEN/4,5/T, dan TEN/9/T adalah 50,9191 MPa, 55,7140 MPa, dan 59,2996 MPa. Sedangkan maksimum *strain* yang dihasilkan ketika sampel putus secara berturut – turut adalah 12,6579 %, 11,0789 %, dan 10,6667 %. Berdasarkan hasil tersebut, nilai *ultimate tensile strenght* terbesar untuk internal geometri segitiga adalah 59,2996 MPa milik sampel TEN/9/T.

Berikutnya adalah hasil pengujian untuk internal geometri *honeycomb*. Grafik tegangan dan regangan maksimum disajikan pada gambar 4.4. Menggunakan variabel kontrol yang sama, nilai *stress* maksimum ketika sampel dengan internal geometri *honeycomb* mengalami *break* adalah 45,6622 MPa dan 53,0172 MPa untuk TEN/4,5/H dan TEN/9/H. Sedangkan besaran nilai regangan maksimum yang dihasilkan dari kedua variabel secara berturut – turut adalah 10,1053 % dan 10,0175 %. Nilai kekautan tarik terbesar untuk internal geometri *honeycomb* adalah 53,0172 MPa untuk sampel TEN/9/H.



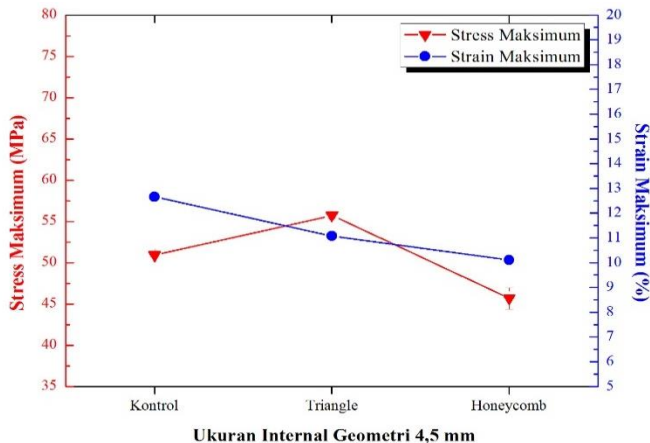
Gambar 4.3 Grafik tegangan regangan maksimum uji tarik sampel *triangle*



Gambar 4.4 Grafik tegangan regangan maksimum uji tarik sampel *honeycomb*



Data pada gambar 4.5 adalah komparasi sampel uji tarik *triangle* dan *honeycomb* dengan ukuran sumbu simetri 4,5 mm. Garis merah menyatakan nilai tegangan maksimum yang dihasilkan dari masing – masing sampel. Diketahui bahwa sampel dengan internal geometri *triangle* memiliki nilai tegangan 55,7140 MPa. Nominal tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan sampel uji tarik dengan internal geometri *honeycomb* dengan besaran nilai tegangan maksimumnya adalah 45,6622 MPa.



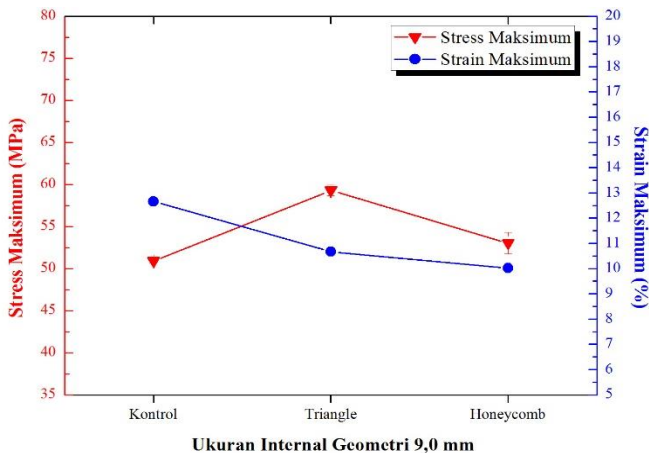
Gambar 4.5 Grafik tegangan regangan maksimum uji tarik sampel dengan internal geometri 4,5 mm

Nilai regangan dari kedua sampel disajikan oleh grafik biru. Sampel TEN/4,5/T dan TEN/4,5/H memiliki nilai regangan sebesar 11,0789 % dan 10,1053 %. Dari data tersebut diketahui bahwa sampel dengan internal geometri *triangle* berukuran sumbu simetri 4,5 mm dapat menahan tegangan yang lebih besar dibandingkan sampel dengan internal geometri *honeycomb* pada ukuran sumbu simetri



yang sama.

Nominal UTS yang dihasilkan oleh sampel TEN/4,5/H memiliki nilai yang paling rendah dibandingkan dengan TEN/K dan TEN/4,5/T dikarenakan sampel TEN/4,5/H merupakan sampel dengan rongga dari geometri terbanyak. Rongga dari geometri ini tentunya akan menurunkan nominal volume sampel yang dihasilkan. Lebih lanjut mengenai pengaruh massa dan volume akan dibahas pada subbab berikutnya



Gambar 4.6 Grafik tegangan regangan maksimum uji tarik sampel dengan internal geometri 9 mm

Berikutnya adalah komparasi antara sampel dengan panjang sumbu simetri 9 mm untuk sampel dengan internal geometri *triangle* dan *honeycomb* yang ditampilkan pada gambar 4.6. Kedua internal geometri mampu menghasilkan nilai tegangan maksimum yang lebih tinggi dari sampel TEN/K. Nilai tegangan dan regangan maksimum dari sampel *triangle* adalah 59,2996 MPa dan 10,6667 %. Kemudian



sampel dengan internal geometri *honeycomb* memiliki nilai 53,0172 MPa dan 10,0175 % yang merupakan nilai tegangan dan regangan maksimum sampel tersebut. Hasil analisis pada grafik yang disajikan pada gambar 4.5 dan 4.6 diketahui bahwa dari masing – masing ukuran sumbu simetri 4,5 mm dan 9 mm, sampel dengan internal geometri *triangle* menunjukkan nilai tegangan dan regangan maksimum yang lebih baik dibandingkan sampel TEN/K dan sampel dengan internal geometri *honeycomb*.

Perbedaan nilai kekuatan dari masing – masing ukuran dan bentuk geometri tentunya dipengaruhi oleh pemilihan variasi ukuran dan bentuk geometri, serta pengaruh dari proses cetak menggunakan 3D *Printer*. Penelitian O.S. Carneiro (2015) mengenai proses cetak menggunakan 3D *Printer* mendapat hasil bahwa tebal *layer* memengaruhi performa mekanik dari sampel uji. Penjelasan mengenai pengaruh tebal *layer* terhadap performa sampel cetak akan dijelaskan pada bagian berikutnya.

Nilai regangan yang dihasilkan dari masing – masing variasi ukuran internal geometri dengan kekuatan tarik tertinggi (TEN/9/T dan TEN/9/H) sebesar 10,6667 % dan 10,0175 %. Nominal tersebut lebih rendah dibandingkan dengan regangan yang dihasilkan oleh TEN/K sebesar 12,6579 %. Secara keseluruhan, besaran nilai *strain* maksimum berada pada rentang 10 – 12 %. Nominal tersebut lebih besar dari rentang nilai regangan dari data referensi yang berkisar pada 1 – 6 %. Hal ini terjadi karena selama proses pencetakan, *bed printer* disetel pada temperatur transisi gelas PLA yaitu 60 °C. Pada temperatur gelas, polimer termoplastik berubah keadaan dan perilakunya dari kaku, getas, padat, seperti gelas menjadi fleksibel, lunak, elastis, seperti fluida (visko - elastik).

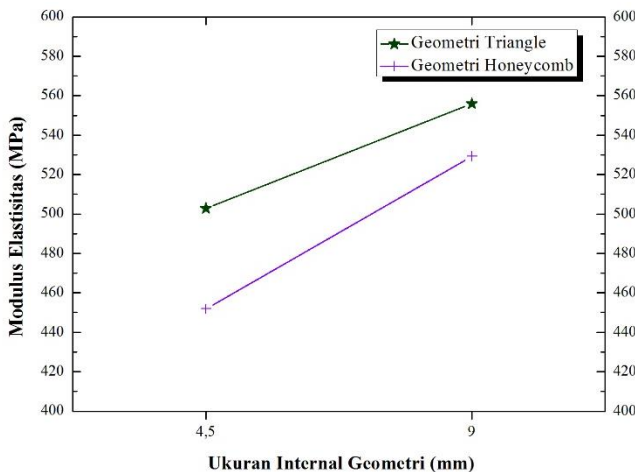
Persen regangan yang dihasilkan dari semua sampel memiliki rentang yang tidak begitu jauh dikarenakan karakteristik material dasar yang digunakan sama. Pembeda yang menjadikan nilainya lebih kecil dari persen regangan sampel TEN/K adalah pengaruh dari internal geometri yang mampu menahan beban



tertentu yang berbeda dengan sampel TEN/K (Enno Ebel, 2014).

Lebih spesifik terhadap properti yang dapat diketahui dan analisis pengaruh internal geometri terhadap sifat mekaniknya, nilai tegangan (σ) dan regangan (ε) dikonversi dalam bentuk grafik modulus elastisitas (E). Modulus elastisitas adalah ukuran kekakuan suatu bahan. Makin besar modulus, makin kecil regangan elastik yang dihasilkan akibat pemberian tegangan. Karena modulus elastisitas diperlukan untuk perhitungan lenturan batang, maka modulus elastik merupakan nilai rancangan yang penting (George E. Dieter, 2012).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots \dots \dots (4.3)$$



Gambar 4.7 Grafik modulus elastisitas uji tarik

Grafik modulus elastisitas pada gambar 4.7 menyajikan keseluruhan data sampel dengan variasi internal geometri hasil pengujian. Nilai modulus elastisitas untuk sampel dengan internal geometri *triangle* adalah 502,8820 MPa dan 555,9336 MPa untuk ukuran 4,5 mm dan 9 mm. Sedangkan nilai modulus elastisitas 451,8657 MPa dan 529,2435 MPa dimiliki oleh sampel dengan



internal geometri *honeycomb* dengan ukuran sumbu simetri 4,5 mm dan 9 mm. Nilai modulus elastisitas tertinggi berdasarkan jenis internal geometri dihasilkan oleh sampel dengan internal geometri *triangle*. Sedangkan berdasarkan pada ukuran sumbu simetri internal geometrinya, nilai modulus tertinggi dimiliki oleh sampel dengan ukuran sumbu simetri internal geometri 9 mm dengan bentuk geometri segitiga. Dari hasil pengujian pula diperoleh nilai modulus elastisitas sampel TEN/K adalah 402,2718 MPa atau lebih rendah dibandingkan dengan ke empat sampel dengan perbedaan variasi internal geometri.

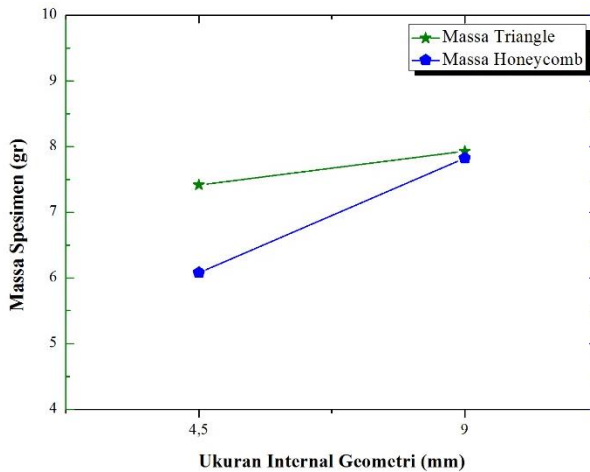
Berdasarkan pada hasil tersebut, dapat diketahui bahwa perbedaan internal geometri yang terdiri dari ketebalan (jarak) antar objek, jumlah geometri, massa dan volume menghasilkan nilai kekuatan tarik yang berbeda.

Oleh karena itu data mengenai massa dan volume dari setiap variabel sampel perlu dihitung untuk mengetahui perbedaan dan korelasinya terhadap kekuatan material. Bahasan mengenai massa dan volume dibahas pada subbab berikutnya.

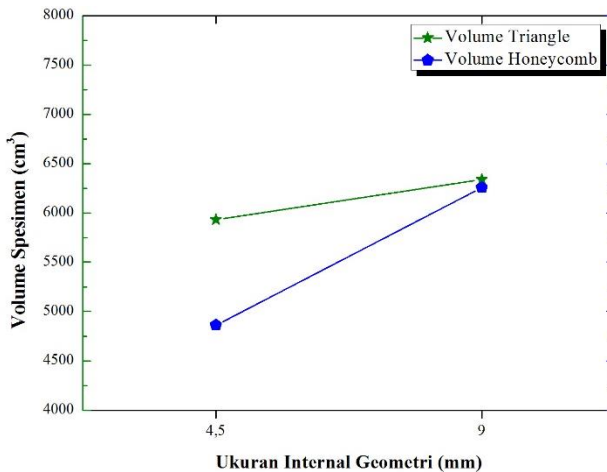
4.4 Perhitungan massa dan volume sampel uji tarik

Nilai massa sampel sudah tentu menjadi berkurang akibat susunan dari internal geometri yang berbentuk lubang pengisi bentuk sampel uji tarik. Gambar 4.8 menyajikan data massa sampel uji tarik. Sampel TEN/K dengan geometri objek solid memiliki massa 13,008 gr.

Sampel dengan ukuran sumbu simetri 4,5 mm memiliki massa masing – masing 7,4146 gr dan 6,0758 gr untuk internal geometri *triangle* dan *honeycomb*. Kemudian, ukuran sumbu simetri 9 mm untuk internal geometri *triangle* dan *honeycomb* massanya adalah 7,9243 gr dan 7,8197 gr. Rata – rata pengurangan massa dibandingkan sampel kontrol berapa pada nominal 7,4 – 7,9 gr. Nilai terendah dimiliki oleh sampel TEN/4,5/H yaitu 6,0758 gr.



Gambar 4.8 Massa sampel uji tarik



Gambar 4.9 Volume sampel uji tarik

Penggunaan satu jenis material *filament* yaitu PLA sudah tentu massa jenis (ρ) materialnya sama. Oleh karena itu massa (m)



yang berkurang tentu diikuti dengan berkurangnya nilai volume (v) yang dihasilkan. Korelasi tersebut bersesuaian dengan persamaan 4. 4 dimana massa jenis adalah hasil bagi antara massa dengan volume sampel. Gambar 4.9 menyajikan nominal volume sampel pengujian tarik dengan tren yang sama dengan massanya.

$$\rho = \frac{m}{v} \dots \dots \dots (4. 4)$$

Volume sampel kontrol untuk pengujian tarik nominalnya adalah 10406,4 cm³. Berikutnya volume sampel dengan internal geometri *triangle* dan *honeycomb* dengan sumbu simetri 4,5 mm adalah 5931,68 cm³ dan 4860,64 cm³. Kemudian untuk ukuran internal geometri dengan sumbu simetri 9 mm secara berturut – turut adalah 6339,44 cm³ dan 6255,72 cm³ dimiliki oleh sampel dengan internal geometri *triangle* dan *honeycomb*. Volume terendah dimiliki oleh sampel uji tarik dengan kode TEN/4,5/H, sedangkan yang tertinggi adalah TEN/9/T.

Infill degree atau persentase volume pencetakan merupakan parameter yang terdapat pada menu pencetakan objek menggunakan mesin 3D *Printer* (Garret W. Malenka, 2016). Objek dengan geometri yang sama memiliki pilihan nilai *infill degree* yang dapat divariasikan. Besaran nilainya dinyatakan dalam persentase volume sampel.

Lebih lanjut, sampel dengan *infill degree* yang sama (100 %) namun memiliki internal geometri yang berbeda tentu memiliki pengaruh terhadap nilai kekuatan objek hasil cetak menggunakan mesin 3D *Printer* (O.S. Carneiro, 2015). Nominal kekuatan tarik yang dihasilkan dari sampel hasil cetak mesin 3D *Printer* dengan variasi internal geometri menghasilkan nominal yang berbeda. Korelasi nilai tegangan tarik maksimum tentunya berpengaruh terhadap besaran nilai modulus elastisitas seperti telah disebutkan pada bahasan sebelumnya.

Tabel 4.4 menampilkan korelasi antara jumlah rongga, massa, volume, dan kekuatan tarik maksimum sampel uji tarik. Nilai kekuatan tarik terkecil yang dimiliki oleh sampel TEN/4,5/H diiringi pula dengan kecilnya nilai massa dan volume sampel tersebut. Hal ini, disebabkan karena pengaruh luasan dan jumlah



geometri dari setiap variabel. Sedangkan massa dan volume tertinggi dimiliki oleh sampel uji tarik dengan kode TEN/9/T yang memiliki nilai massa dan volume terbesar dibanding dengan sampel lain yang divariasikan internal geometrinya. Pengurangan volume sampel dengan variasi internal geometri berdampak pada performa sampel. Pengurangan massa hingga 60 % pada variasi geometri menunjukkan nilai yang signifikan pada UTS yang dihasilkan.

Tabel 4.4 Jumlah rongga, massa, volume, dan tegangan maksimum sampel uji tarik

Kode Sampel	Jumlah Rongga	Massa (gr)	Volume (cm ³)	<i>Stress</i> Maksimum (MPa)
TEN/K	0	13,008	10406,4	50,9191
TEN/4,5/T	102	7,4146	5931,68	55,7140
TEN/9/T	33	7,9243	6339,44	59,2996
TEN/4,5/H	133	6,0758	4860,64	45,6622
TEN/9/H	33	7,8197	6255,72	53,0172

Kondisi tersebut berbanding lurus dengan jumlah dari masing – masing rongga yang terbentuk dari internal geometri setiap variabel. Kekuatan tarik terendah yang dimiliki oleh sampel TEN/4,5/H sebanding dengan jumlah rongga yang tercetak yaitu 133 lubang. Jumlah tersebut merupakan rongga terbanyak diantara sampel uji tarik yang lain. Data tersebut menjelaskan bahwa dengan jenis bentuk objek tiga dimensi yang sama yaitu sampel uji tarik, jumlah geometri yang dapat dihasilkan dan bentuknya bisa berbeda – beda. Meskipun nilai sumbu simetri dari setiap objek menggunakan nilai pembandingan yang sama.

Lebih mendetail, pokok bahasan utama mengenai variasi internal geometri tentunya dianalisis melalui berbagai pendekatan. Salah satunya adalah simulasi tegangan menggunakan *software* Inventor untuk menganalisis kemungkinan lokasi terjadinya



konsentrasi tegangan yang dapat memicu terjadinya *fracture* atau kegagalan (Tomislav Galeta, 2016).

4.5 Analisis simulasi tegangan menggunakan *software Inventor*

Analisis simulasi tegangan pada pengujian tarik diaplikasikan menggunakan *software Inventor*. Simulasi ini digunakan untuk memprediksi lokasi kemungkinan terjadinya konsentrasi tegangan yang dapat memicu terjadinya *fracture* atau kegagalan (Tomislav Galeta, 2016). Pendekatan dari simulasi ini menggunakan metode elemen hingga dari struktur. Metode elemen hingga ini digunakan sebagai petunjuk untuk menentukan lokasi tegangan maksimum dan variasi tegangan dari sampel pengujian, serta kemungkinan lokasi terjadinya *cracking* (Tomislav Galeta, 2016).

Parameter simulasi *stress analysis* yang harus disesuaikan sebagai pendekatan kondisi pengujian tarik sesungguhnya adalah *material*, *constraints*, *load*, *contacts*, dan *mesh*. Pemilihan jenis material digunakan agar sampel simulasi memiliki properti fisik dan mekanik yang sama dengan material *filament PLA*.

Constraints adalah sub-menu *stress analysis* yang digunakan untuk mengunci atau mematikan gerakan dari objek pada permukaan objek atau titik – titik tertentu pada objek. Simulasi pengujian tarik ini menggunakan *constraints* dengan titik yang sama pada pengujian tarik yang sesungguhnya yaitu pada *grip* atau pegangan sampel. Tentunya pemilihan permukaan atau titik yang akan di *constraints* harus memerhatikan desain awal bentuk sampel agar dapat diperoleh hasil yang sesuai.

Berikutnya adalah beban atau *load* yang akan dikenakan pada sampel simulasi. Besaran nilai *load* dari setiap variabel sampel diinput berdasarkan pada *load* maksimum pada pengujian tarik sesungguhnya. Tabel 4.5 menyajikan rata-rata data *load* untuk setiap hasil pengujian tarik sesungguhnya.

Simulasi pertama dilakukan pada sampel TEN/K dengan hasil yang ditunjukkan pada gambar 4.10. Urutan gambar dari atas

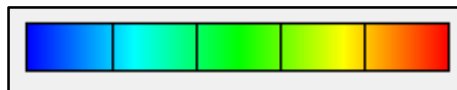


ke bawah sama dengan urutan kode sampel pada tabel 4. 5.

Tabel 4.5 *Load* maksimum pengujian tarik

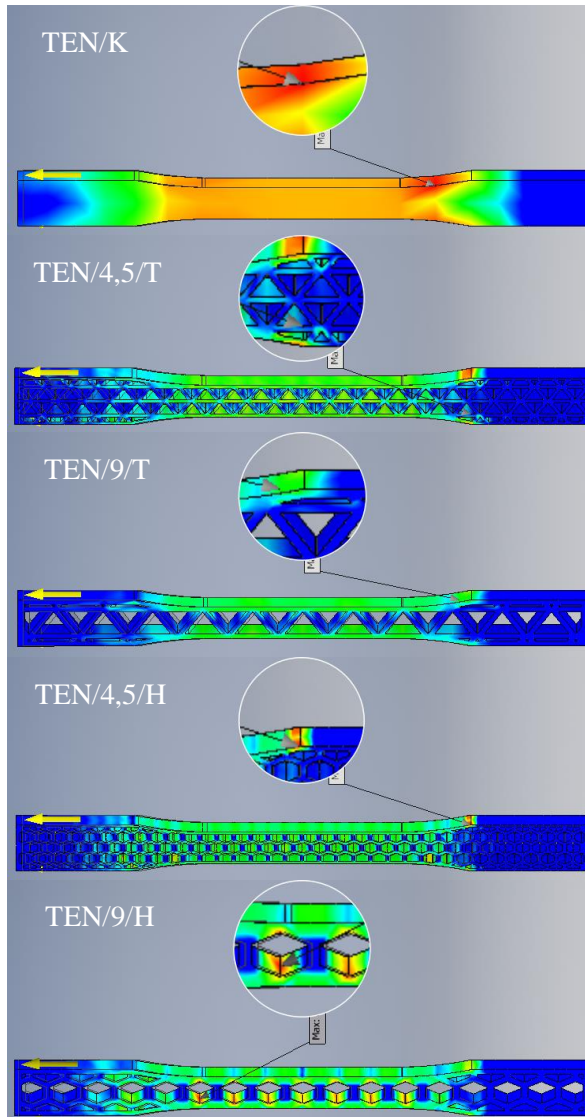
Kode Sampel	<i>Load</i> (N)
TEN/K	2647,80
TEN/4,5/T	891,42
TEN/9/T	948,80
TEN/4,5/H	730,60
TEN/9/H	848,28

Gambar 4.10 menampilkan kemungkinan lokasi terjadinya konsentrasi tegangan yang dapat memicu terjadinya patahan. Perbedaan warna yang dihasilkan adalah indikasi nilai tegangan yang mungkin terjadi pada area atau titik – titik tertentu pada sampel uji tarik yang disimulasikan menggunakan *software* Inventor. Agar lebih mudah menerjemahkan sebaran tegangan yang dihasilkan maka spektrum warna pada *software* Inventor disajikan pada gambar 4.11. Warna biru paling kiri memiliki nilai terendah, sedangkan semakin ke kanan nilainya semakin besar dan mencapai maksimum apabila warnanya merah.



Gambar 4.10 Spektrum warna nilai tegangan
(biru : minimum, merah : maksimum)

Perlu diketahui bahwa objek tiga dimensi yang terbentuk pada *software* Inventor adalah objek solid yang serupa dengan objek hasil proses *compression molding* maupun *injection molding*. Oleh karena itu, nominal tegangan dan regangan maksimum dari hasil simulasi ini kurang relevan jika dibandingkan dengan objek hasil cetak mesin 3D *Printer* yang proses pembentukannya berdasarkan prinsip *bottom up* membentuk lapisan – lapisan dengan ketebalan yang seragam.



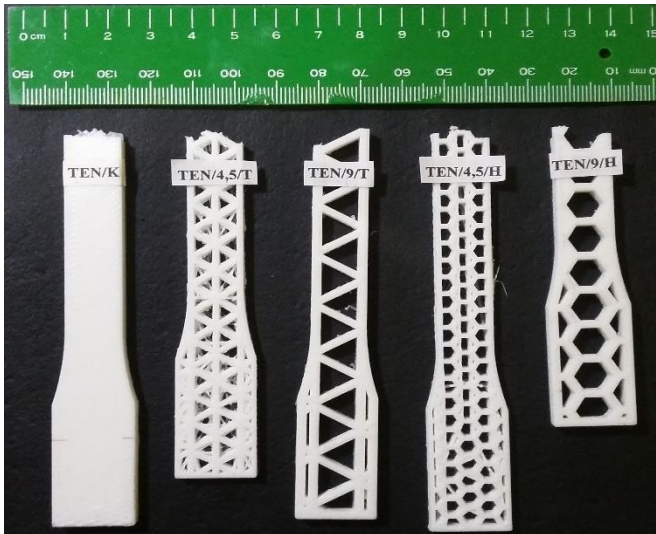
Gambar 4.11 Lokasi patahan pengujian tarik menggunakan *software* Inventor



Simulasi ini menggunakan perhitungan tegangan berdasarkan kriteria von Mises. Von Mises (1913) menyatakan bahwa akan terjadi luluh bilamana invarian kedua deviator tegangan melampaui harga kritis tertentu. Dengan kata lain luluh akan terjadi pada saat energi distorsi atau energi regangan geser dari material mencapai suatu nilai kritis tertentu. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa energi distorsi adalah bagian dari energi regangan total per unit volume yang terlibat di dalam perubahan bentuk. Dalam ilmu material dan teknik, kriteria luluh von Mises dapat juga diformulasikan dalam von Mises *stress* atau *equivalent tensile stress*, nilai tegangan skalar dapat dihitung dari tensor tegangan. Dalam kasus ini, material dikatakan mulai luluh ketika tegangan von Mises mencapai nilai kritis yang diketahui sebagai *yield strength*. Tegangan von Mises digunakan untuk memprediksi tingkat keluluhan material terhadap kondisi pembebanan dari hasil pengujian tarik simpel uniaksial (Atmojo, 2012).

Berdasarkan hasil simulasi, sebagian besar kemungkinan lokasi patahan berada pada *transition radius* dari masing – masing sampel. Kemungkinan ini terjadi diakibatkan karena bentuk internal geometri dari setiap sampel terpotong akibat dari bentuk spesimen yang mengikuti standar dimensi dari ASTM D638. Prediksi lain untuk lokasi patahan dari sampel dapat diamati pada area *gage length* setiap sampel (Tomislav Galeta, 2016). Pendekatan menggunakan simulasi Inventor juga digunakan untuk menganalisis efek dari perbedaan ukuran dan bentuk geometri yang dihasilkan. Berdasarkan sebaran warna tegangan pada masing – masing sampel, nampak bahwa sampel dengan geometri segitiga mampu menahan beban tarik lebih baik dibandingkan dengan sampel *honeycomb*.

Hasil simulasi menunjukkan distribusi tegangan yang merata pada daerah tersebut. Lebih detail terlihat bahwa sisi – sisi dari setiap penyusun internal geometri yang searah dengan arah gaya mengalami tegangan yang cukup tinggi dibandingkan dengan gaya yang bekerja di lokasi *grip* sampel uji tarik.



Gambar 4.12 Patahan sampel hasil uji tarik

Gambar 4.12 menyajikan gambar sampel hasil pengujian tarik dari sampel TEN/K, TEN/4,5/T, TEN/4,5/H/ TEN/9/T, dan TEN/9/H urut dari kiri ke kanan. Hampir keseluruhan lokasi patahan berada pada *gage length* sampel uji tarik, kecuali sampel TEN/4,5/H yang patah pada lokasi *transition radius*. Lokasi patahan yang dihasilkan dari pengujian tarik menunjukkan tren yang sama dengan hasil simulasi menggunakan *software* Inventor. Patahan yang dihasilkan oleh sampel kontrol terlihat rata dan jelas lapisan – lapisan penyusun dari setiap *layer*nya. Kemudian sampel berikutnya yaitu TEN/4,5/T mengalami patah pada bagian ujung sudut – sudut internal geometri segitiga atau pertemuan sudut dalam segitiga. Berbeda dengan TEN/4,5/T, TEN/4,5/H mengalami patah di daerah dekat dengan *transition radius* dengan lokasi patahan berada pada pertemuan sudut antar sisi penyusun geometri *honeycomb*. Berikutnya sampel dengan panjang sumbu simetri 9 mm yaitu TEN/9/T dan TEN/9/H menunjukkan hasil yang sama dengan hasil simulasi. Patahan terjadi ujung – ujung sisi yang membentuk sudut dari setiap geometri yang lokasinya berada



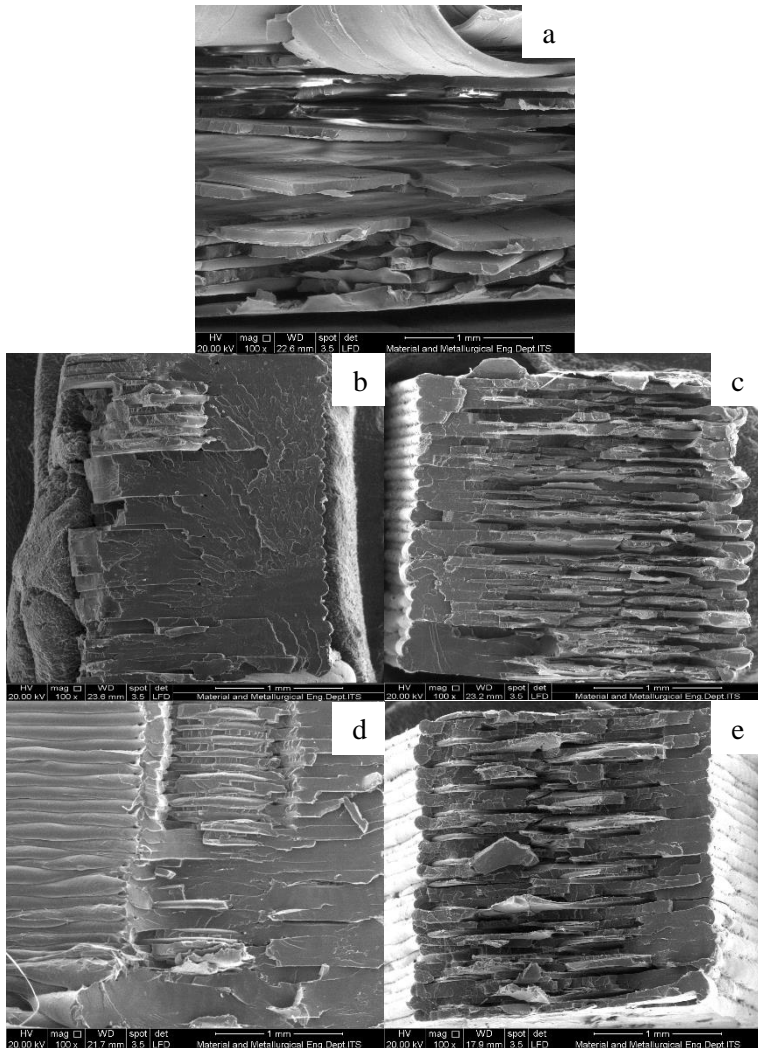
searah dengan arah gaya yang bekerja pada sampel. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa simulasi analisis uji tarik pada *software* Inventor dengan kriteria tegangan von Mises dan metode elemen hingga struktur hampir sama dengan kondisi pengujian sesungguhnya. Kondisi tersebut menjelaskan bahwa internal geometri memiliki pengaruh terhadap kekuatan sampel hasil cetak menggunakan mesin 3D *Printer* (Tomislav Galeta, 2016).

4.6 Analisis morfologi pengujian tarik

Morfologi hasil sampel pengujian tarik dengan variasi internal geometri ditunjukkan dengan foto mikro *Scanning Electron microscope* (SEM). Pengujian morfologi dilaksanakan di laboratorium karakterisasi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS. Sampel hasil uji tarik yang akan diambil foto mikronya adalah penampang melintang pada permukaan area sampel uji tarik yang mengalami patahan. Sebelum masuk dalam mesin SEM, terlebih dahulu sampel dipreparasi *coating* dengan material AuPd.

Gambar 4.13 menampilkan foto mikro hasil SEM dari keseluruhan sampel uji tarik pada perbesaran 100 kali. Dari keseluruhan gambar nampak bahwa material *filament* PLA yang digunakan untuk mencetak sampel uji tarik bersifat getas (*brittle*). Terlihat dari karakteristik patahannya yang datar dan pipih tanpa adanya serabut – serabut seperti bekas tarikan (Giita Silverajah, 2012).

Kemudian dari hasil foto mikro nampak bahwa terdapat perbedaan antara bentuk patahan dari setiap sampel. Sampel TEN/K memiliki patah yang lancip membentuk sudut dan nampak lapisan – lapisan penyusun sampel dari hasil cetak menggunakan mesin 3D *Printer*. Berikutnya sampel *triangle* dan *honeycomb* dengan panjang sumbu simetri 4,5 mm nampak jelas daerah inisiasi *crack* dan perambatannya. Inisiasi diawali pada area dengan permukaan yang datar kemudian menjalar pada area disekitarnya yang nampak bergelombang.



Gambar 4.13 Hasil SEM perbesaran 100x sampel uji tarik
(a)TEN/K, (b)TEN/4,5/T, (c)TEN/9/T, (d)TEN/4,5/H,
(e)TEN/9/H

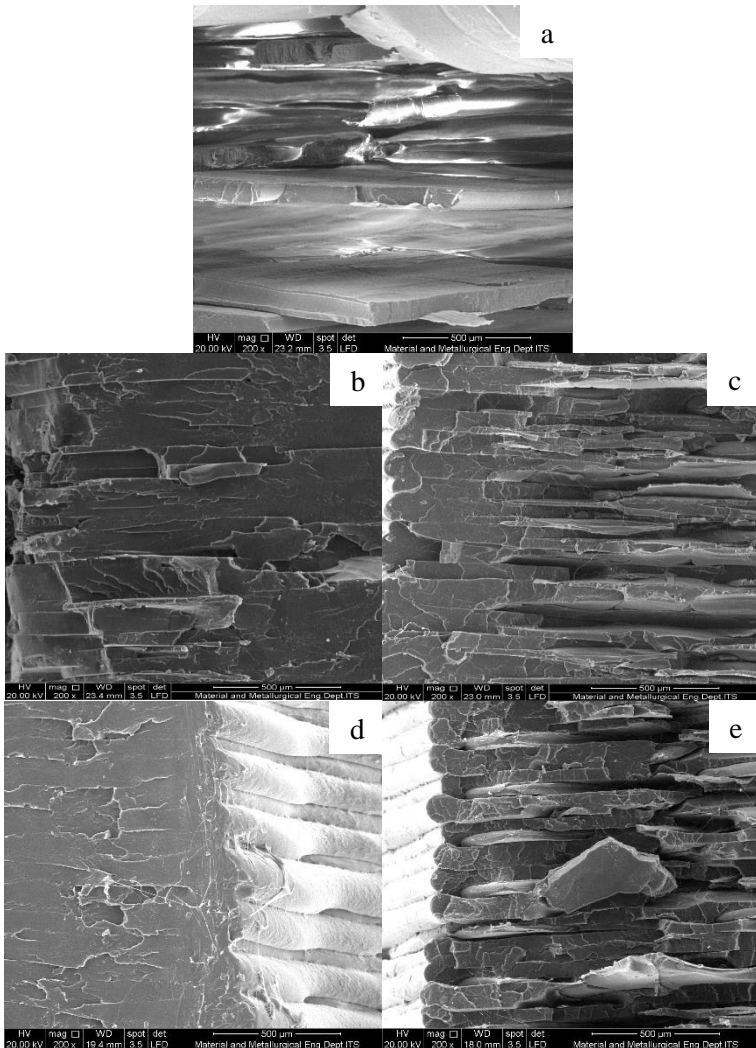


Kondisi tersebut berbeda dengan morfologi yang dihasilkan oleh sampel dengan ukuran sumbu simetri 9 mm. Sampel TEN/9/T nampak jelas inisiasi diawali dari sudut bagian dalam internal geometri segitiga. Kondisi tersebut teramati dari lapisan – lapisan hasil deposisi *filament* PLA yang terbentuk saat proses pencetakan. Sedikit berbeda, sampel TEN/9/H menghasilkan pola patahan yang menyerupai pola patahan TEN/K hanya saja patahan yang terbentuk lebih kecil dan tipis. Pada bagian antar lapisannya juga terdapat bagian yang mengalami *opening crack*.

Lebih detail hasil SEM sampel uji tarik ditampilkan pada gambar 4.14 dengan perbesaran objek 200 kali. Dari gambar terlihat jelas terdapat perbedaan interaksi antar lapisan yang dihasilkan dari proses cetak tiga dimensi pada setiap sampel. Kondisi ini terjadi karena pengaruh proses cetak dari setiap sampel uji (Arghavan Farzadi, 2015).

Dengan urutan letak gambar yang sama dengan hasil SEM pada perbesaran 100 kali, gambar 4.14 menampilkan area terjadinya inisiasi *crack* dan interaksi antar *layer* pada perbesaran 200x. Proses cetak menggunakan mesin 3D *Printer* memengaruhi sampel hasil cetak. Menggunakan parameter pencetakan yang sama, mesin 3D *Printer* memiliki kecenderungan untuk mengatur pola pergerakan *nozzle* yang menyesuaikan bentuk dan tebal dari masing – masing geometri. Sampel dengan ukuran sumbu simetri 4,5 mm dengan jarak (ketebalan) antar geometri 1 mm menghasilkan sampel yang solid antar lapisan penyusunnya. Berbeda dengan sampel kontrol dan sampel dengan ukuran 9 mm.

Hasil antar lapisan dari geometri yang lebih besar menghasilkan lapisan – lapisan yang sama ukurannya dari setiap lapis dan dapat dengan jelas terlihat antar lapisannya dari foto mikro hasil uji SEM. Dengan nominal *layer height* yang sama yaitu 0,1 mm dan *thickness* 0,6 mm, ternyata mengasilkkan sampel dengan morfologi yang berbeda.



Gambar 4.14 Hasil SEM perbesaran 200x sampel uji tarik
(a)TEN/K, (b)TEN/4,5/T, (c)TEN/9/T, (d)TEN/4,5/H,
(e)TEN/9/H



Berdasarkan kondisi hasil foto mikro, diketahui bahwa proses pencetakan menggunakan mesin 3D *Printer* tidak persis 100% dengan desain awal. Fakta hasil uji SEM memperlihatkan bahwa ukuran geometri dapat memengaruhi ketelitian dan *layer* yang dihasilkan. Ukuran ketebalan yang terlalu kecil (1 mm) menjadikan lapisan yang telah tercetak akan tertekan oleh lapisan berikutnya, begitu seterusnya. Kondisi penekanan oleh lapisan yang sedang dicetak terhadap lapisan yang telah tercetak menyebabkan lapisan menjadi pipih dan melebar membentuk *shell thickness* yang lebih lebar dari nominal yang telah ditentukan pada parameter cetak. Kondisi tersebut menyebabkan kondisi permukaan antar lapisannya menjadi berbeda seperti hasil pada sampel dengan geometri 4,5 mm. Hasil tersebut menjadikan kemampuan sampel dengan ukuran geometri 4,5 mm untuk menahan beban tarik lebih rendah dari sampel dengan ukuran geometri 9 mm. Melalui proses yang sama, hasil sampel dengan ukuran geometri 9 mm nampak memiliki lapisan yang tersusun sama ukurannya dan melekat satu sama lain. Kondisi tersebut menjadikan antar lapisan dari sampel uji memiliki komposisi yang sama dan saling menguatkan.

Dengan hasil cetak yang baik lapisannya, sampel dengan ukuran geometri 9 mm mampu menahan beban tarik lebih baik dibandingkan dengan sampel berukuran 4,5 mm. Hal ini karena sampel berukuran 9 mm dapat mendistribusikan gaya dengan nominal yang hampir sama pada setiap lapisnya.

4.7 Analisis pengujian bending

Sampel uji bending dicetak sesuai dengan standar ASTM D790. Mesin dan lokasi pengujian sampel bending sama dengan pengujian tarik.

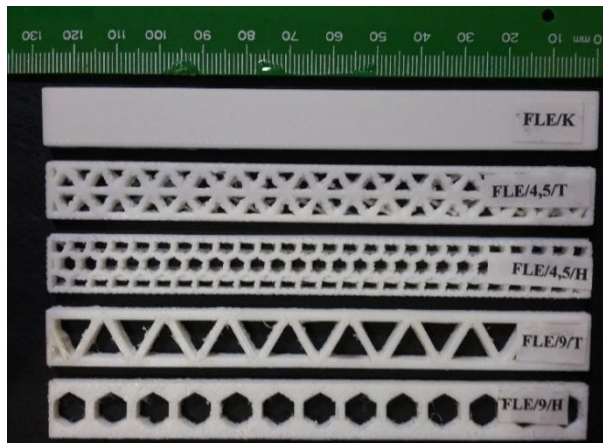
Uji bending dilakukan untuk mengetahui besarnya kekuatan lentur dari material PLA yang telah divariasikan internal geometrinya. Pengujian dilakukan dengan cara memberi beban lentur secara perlahan – lahan sampai sampel mencapai titik leleh.



Perlakuan uji bending mengakibatkan sampel pada bagian atas mengalami proses penekanan dan bagian bawah sampel mengalami proses tarik sehingga spesimen mengalami patah pada bagian bawah karena tidak mampu menahan tegangan tarik (Vishu Shah, 1998).

Data yang diperoleh dari pengujian berupa maksimum *load* dan defleksi yang diterima oleh sampel. Data tersebut kemudian diolah dan dikonversi menjadi nilai *flexural strength* dan *flexural modulus* dari setiap sampel. *Flexural strength* merupakan hasil perhitungan gaya per satuan luas pada daerah spesimen yang patah dalam pembebanan lentur (Vishu Shah, 1998). Persamaan 4. 5 adalah formula untuk menentukan nilai kekuatan fleksural dari spesimen uji. P adalah *load* yang diterima oleh spesimen, dan L adalah *length of span*. Sedangkan b x d adalah perkalian antara tebal dan lebar spesimen. Lebar sampel kontrol (FLE/K) adalah 13 mm, sedangkan sampel dengan variasi internal geometri adalah 4 mm. Nilai ini digunakan berdasarkan pada permukaan yang mengalami kontak dengan indenter uji bending.

$$S = \frac{3PL}{2bd^2} \dots \dots \dots (4. 5)$$



Gambar 4.15 Sampel uji bending

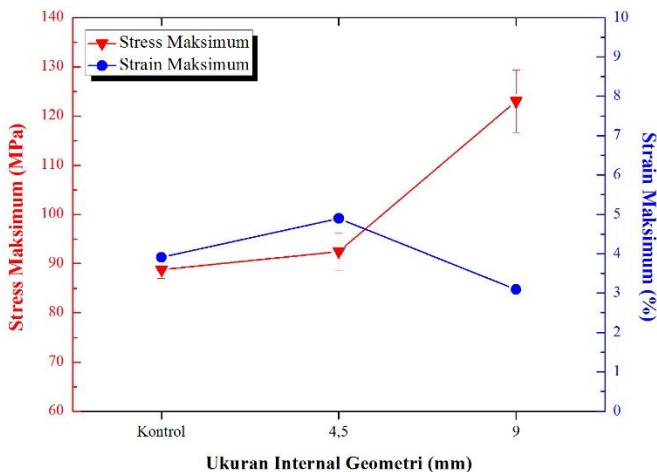


Tabel 4.6 *Flexural Strength PLA*

Sampel	Filament PLA BotFeeder (lampiran)	FLE/K
<i>Flexural Strength</i> (MPa)	80 - 114	88,7880

Gambar 4.15 adalah sampel uji bending hasil cetak menggunakan mesin 3D *Printer*. Nominal kekuatan bending dari sampel FLE/K dikomparasi dengan data referensi *datasheet filament PLA*. Tabel 4.6 menampilkan data referensi dan nilai kekuatan bending dari spesimen FLE/K.

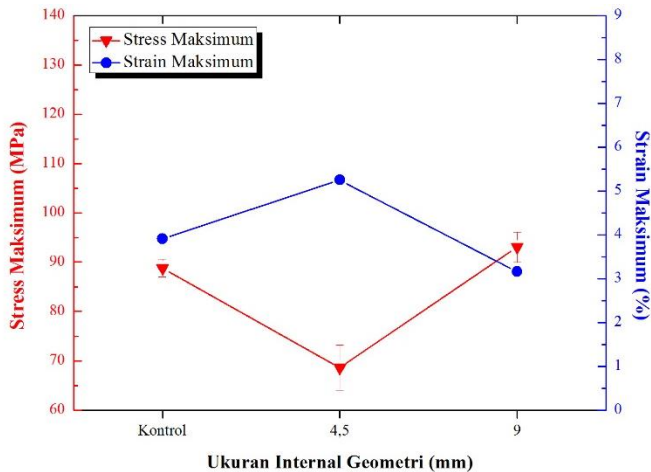
Nilai kekuatan bending dari sampel FLE/K sebesar 88,7880 MPa. Nominal tersebut berada pada rentang kekuatan bending referensi yaitu 80 – 114 MPa. Mengacu pada data referensi, hasil uji bending untuk sampel kontrol sudah memenuhi nilai kekuatan yang diinginkan. Artinya, proses cetak untuk sampel bending telah sesuai dengan parameter yang digunakan.



Gambar 4.16 Grafik tegangan regangan maksimum uji bending sampel *triangle*



Gambar 4.16 adalah data tegangan dan regangan dari sampel uji bending dengan internal geometri *triangle*. Grafik stress menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel FLE/K. Sampel dengan ukuran internal geometri 4,5 mm memiliki nilai kekuatan bending 92,4760 MPa dengan nilai regangan sebesar 4,8960 %. Kemudian untuk sampel dengan ukuran geometri 9 mm diperoleh hasil tegangan dan regangan maksimumnya sebesar 123,0021 MPa dan 3,0883 %. Sampel *triangle* dengan internal geometri 9 mm menghasilkan nilai tegangan bending yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel dengan ukuran geometri 4,5 mm.



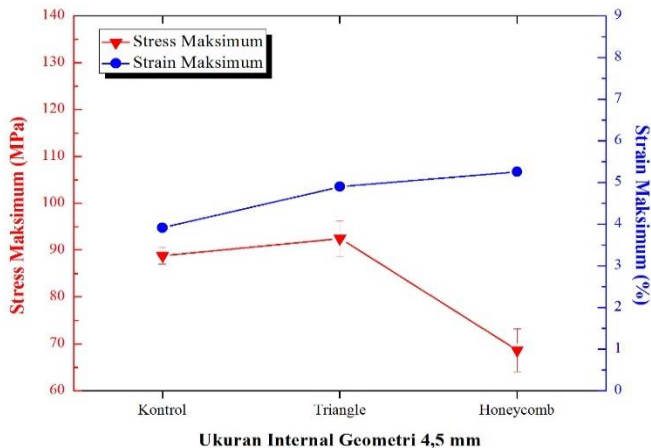
Gambar 4.17 Grafik tegangan regangan maksimum uji bending sampel *honeycomb*

Selanjutnya adalah sampel dengan geometri *honeycomb*. Nilai tegangan dan regangan ditampilkan oleh grafik gambar 4.17. Dari grafik nampak bahwa sampel dengan ukuran internal geometri 4,5 mm memiliki nilai tegangan bending yang lebih rendah dari sampel *honeycomb* berukuran 9 mm. Nilai tegangan dari masing – masing sampel *honeycomb* 4,5 mm dan 9 mm berturut – turut

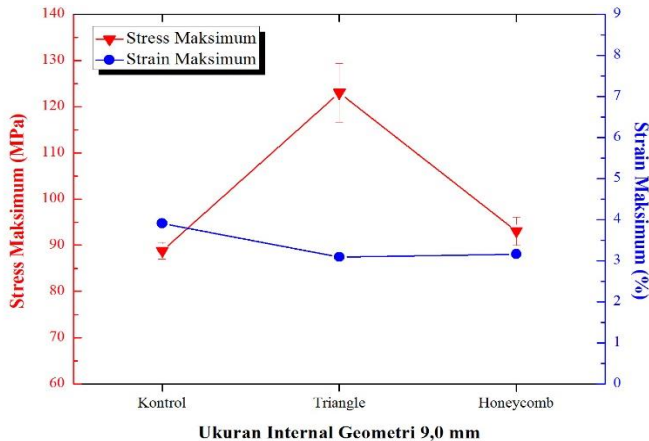


adalah 68,5939 MPa dan 93,0147 MPa dengan nilai regangan 5,2493 % dan 3,1584 %. Sampel FLE/4,5/H memiliki nilai *stress* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan sampel FLE/K.

Gambar 4.18 dan 4.19 menampilkan data perbandingan geometri berdasarkan ukuran internal geometri dari setiap sampel. Gambar 4.18 adalah grafik untuk sampel dengan ukuran internal geometri 4,5 mm. Dengan nominal tegangan yang sama seperti yang telah disebutkan sebelumnya, dari grafik tegangan terlihat bahwa nilai tegangan bending sampel *triangle* dengan internal geometri 4,5 mm lebih tinggi dibandingkan dengan geometri *honeycomb* pada ukuran yang sama.



Gambar 4.18 Grafik tegangan regangan maksimum uji bending sampel dengan internal geometri 4,5 mm



Gambar 4.19 Grafik tegangan regangan maksimum uji bending sampel dengan internal geometri 9 mm

Berikutnya, gambar 4.19 menampilkan grafik komparasi yang sama dengan gambar 4.18 untuk geometri dengan ukuran 9 mm. Tren grafik menunjukkan pola yang sama dengan gambar 4.18, yaitu sampel dengan bentuk geometri *triangle* memiliki nilai tegangan yang lebih tinggi dari geometri *honeycomb*.

Hasil dari masing – masing ukuran dan jenis geometri diketahui bahwa sampel *triangle* memiliki kemampuan menerima tegangan yang lebih besar jika dibandingkan dengan geometri *honeycomb*.

Karakteristik batang atau sampel uji bending ketika menerima perlakuan dapat dijelaskan dengan persamaan tegangan normal. Dimana tegangan normal dinotasikan (σ), (M) adalah momen lentur pada penampang, kemudian jarak dari sumbu netral ke penampang dinotasikan dalam (y), dan (I) adalah momen inersia dari batang uji. Menggunakan persamaan modulus, dimana tegangan yang terjadi pada sumbu x sama dengan hasil kali antara modulus dengan elongasi yang terjadi pada sumbu x . Tegangan normal yang ada bervariasi terhadap jarak y dari permukaan netral. Sehingga pada kondisi netral, momen yang dihasilkan adalah nol.

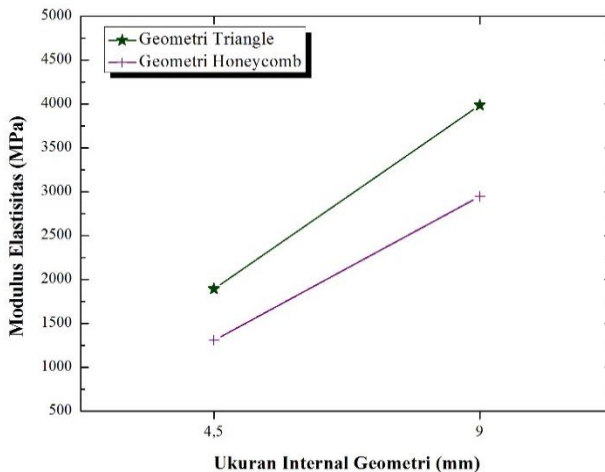


Pada lapisan terluar batang koordinat y dinotasikan dengan simbol c , sehingga tegangan normal yang bekerja akan dibagi oleh nilai Z , yaitu hasil bagi antara I/c , atau disebut juga dengan modulus penampang.

$$\sigma = \frac{My}{I} \dots \dots \dots (4.6)$$

Agar lebih mudah membandingkan, hasil tegangan dan regangan yang diperoleh diubah dalam grafik modulus elastisitas pada gambar 4.20. Grafik pada gambar 4.20 menyajikan seluruh data sampel dengan variasi ukuran dan bentuk internal geometri. Grafik berwarna hijau dimiliki oleh sampel *triangle*, sedangkan *honeycomb* diwakili oleh grafik berwarna ungu. Sampel FLE/K sendiri memiliki nilai modulus elastisitas sebesar 2271,2898 MPa.

Sampel dengan ukuran geometri 4,5 mm memiliki nilai modulus sebesar 1889,7168 MPa dan 1306,4842 MPa masing – masing untuk geometri *triangle* dan *honeycomb*.



Gambar 4.20 Grafik modulus elastisitas uji bending

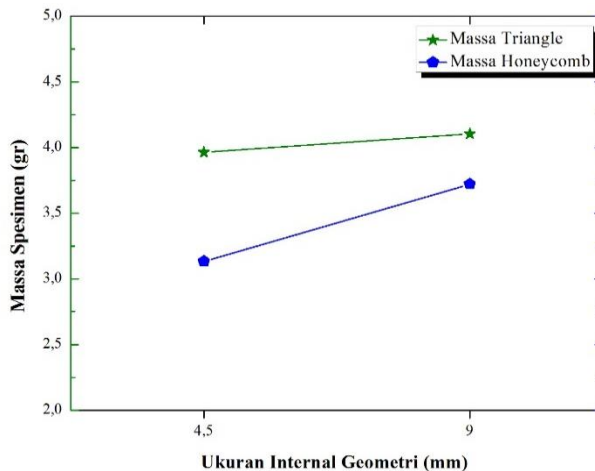
Kemudian untuk geometri dengan ukuran 9 mm adalah 3983,6956 MPa milik sampel FLE/9/T dan 2945,2834 MPa untuk



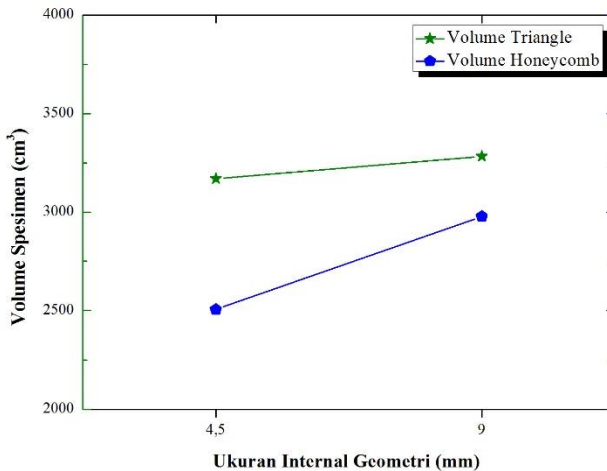
sampel FLE/9/T. Berdasarkan hasil tersebut, data tertinggi dimiliki oleh sampel *triangle* dengan ukuran geometri 9 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa geometri memberikan pengaruh terhadap ketahanan bending dari material PLA. Data tersebut perlu dikorelasikan dengan total massa dan volume dari masing – masing sampel agar diketahui komposisi yang sesuai untuk membuat objek dengan variasi geometri.

4.8 Perhitungan massa dan volume sampel uji bending

Gambar 4.21 menunjukkan nilai massa dari masing – masing ukuran dan bentuk geometri sampel. Tren grafik massa pada gambar 4.21 sama dengan grafik volume sampel yang di tampilkan pada gambar 4.22. Grafik menunjukkan bahwa massa dan volume sampel dari geometri dengan ukuran 9 mm memiliki massa dan volume yang lebih besar dibandingkan dengan sampel dengan ukuran geometri 4,5 mm. Hal ini dapat dijelaskan karena pengaruh jumlah dan ukuran geometri sampel 9 mm lebih besar namun jumlahnya lebih sedikit dibandingkan dengan sampel ukuran 4,5 mm.



Gambar 4.21 Massa sampel uji bending



Gambar 4.22 Volume sampel uji bending

Tabel 4.7 Jumlah rongga, massa, volume, dan tegangan maksimum sampel uji bending

Kode Sampel	Jumlah Rongga	Massa (gr)	Volume (cm ³)	<i>Stress</i> Maksimum (MPa)
FLE/K	0	6,6988	5359	88,7880
FLE/4,5/T	66	3,9621	3169,68	92,4760
FLE/9/T	19	4,1038	3283,04	123,0021
FLE/4,5/H	77	3,1323	2505,8	68,5939
FLE/9/H	13	3,7216	2977,24	93,0147

Tabel 4.7 menyajikan data dari rongga, massa, volume, dan UTS dari masing – masing sampel. Nilai terendah dimiliki oleh sampel FLE/4,5/H dengan nominal massa, volume, serta nilai tegangan maksimumnya adalah 3,1323 gr, 2505,8 cm³, 68,5939 MPa. Sedangkan nilai tertinggi dimiliki oleh sampel FLE/9/T yaitu 4,1038 gr, 3283,04 cm³, dan 123,0021 MPa. Berdasarkan pada



hasil perhitungan massa dan volume nampak bahwa terdapat korelasi antara pengurangan massa akibat perbedaan internal geometri terhadap kekuatan sampel dengan geometri tertentu.

Sedangkan perbandingan jumlah rongga dari sampel uji bending hampir sama dengan sampel uji tarik. Rongga terbanyak dimiliki oleh sampel FLE/4,5/H dengan jumlah 77 yang berakibat pada pengurangan massa sampai 53,2 % dari massa sampel kontrol. Dari data tersebut diketahui bahwa perbedaan massa yang berpengaruh pada pengurangan volume diakibatkan oleh perbedaan luasan dari masing – masing internal geometri. Selain bentuk geometrinya, luasan dari setiap geometri memiliki pengaruh terhadap kekuatan dari objek tersebut, karena berdampak pada volume yang dihasilkan.

Selain pengaruh jumlah rongga, massa, dan volume, analisis lainnya untuk mengetahui pengaruh internal geometri diamati dari hasil foto mikro morfologi patahan uji bending. Dari pola patahan, nantinya akan diketahui pengaruh proses pencetakan terhadap karakteristik dan kekuatan dari masing – masing sampel.

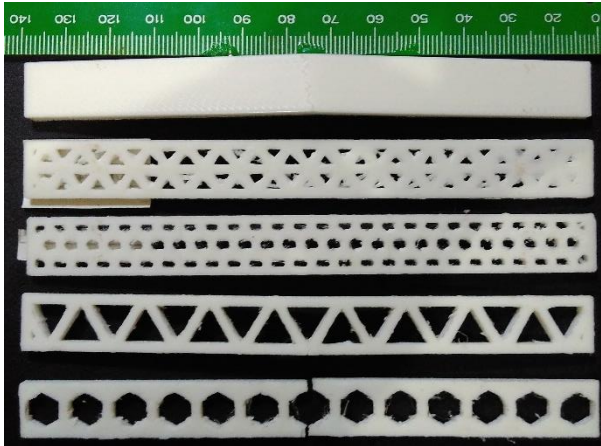
4.9 Analisis morfologi pengujian bending

Gambar 4.23 adalah foto sampel uji bending yang telah mengalami defleksi dilihat dari penampang bagian bawah. Nampak jelas bahwa sampel kontrol mengalami defleksi dan retak pada bagian yang mengalami beban tarik. Sampel dengan panjang sumbu simetri 4,5 mm hanya mengalami defleksi tanpa mengalami patah. Berbeda dengan sampel dengan ukuran geometri 9 mm yang mengalami retak pada ujung pertemuan sudut segitiga, sedangkan geometri *honeycomb* patah menjadi dua pada bagian tengah dari pertemuan antara sisi – sisi penyusun bentuk *honeycomb*.

Sampel dengan ukuran geometri menunjukkan sifat lentur yang baik ketika dibebani pada arah horizontal pada permukaan sampel. Kemampuan ini dimiliki oleh sampel dengan internal geometri 4,5 mm karena jumlah geometri penyusunnya lebih dari satu deret dan saling terkait satu sama lain, sehingga distribusi gaya yang diterima merata. Meskipun demikian, telah dijelaskan pada



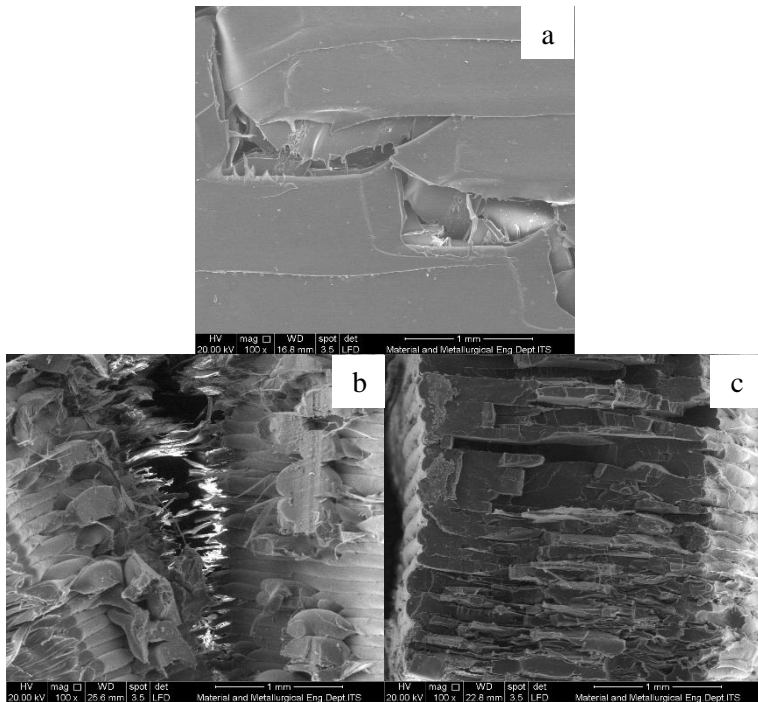
subbab sebelumnya bahwa ketebalan (jarak) antar geometri memiliki peranan dalam kekuatan geometri. Dengan kata lain, sampel dengan ukuran geometri 4,5 mm dan jarak antar geometrinya 1 mm memiliki kemampuan menahan atau menerima beban lebih rendah dibandingkan dengan sampel dengan ukuran geometri 9 mm dengan jarak antar geometri 2 mm.



Gambar 4.23 Defleksi sampel hasil uji bending

Pola retakan dan patahan hasil uji bending selanjutnya diamati menggunakan SEM untuk melihat pola patahan secara lebih detail. Foto mikro dari sampel uji bending ditampilkan pada gambar 4.24.

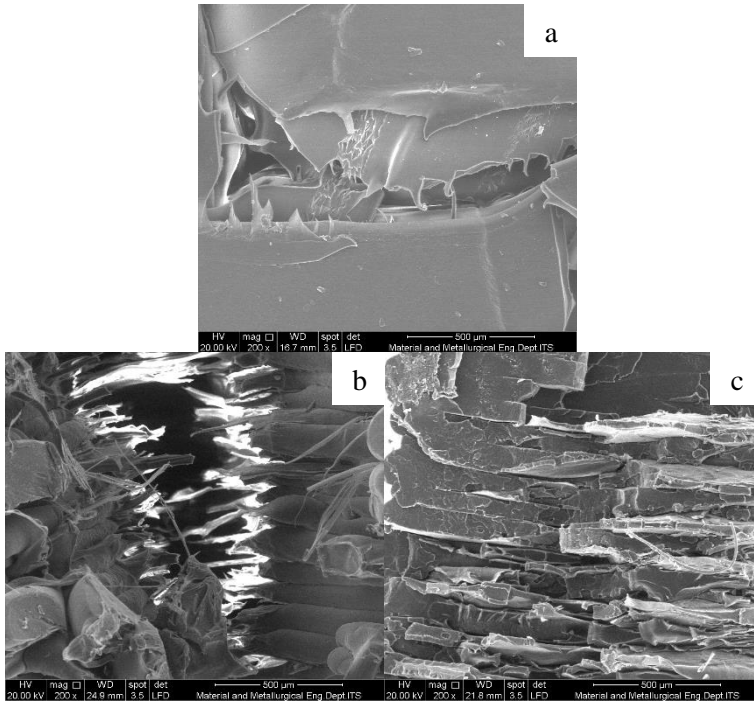
Foto mikro pada gambar 2.24 adalah hasil SEM pada perbesaran 100x. Nampak bagian yang menerima tegangan tekan pada sampel kontrol mengalami *tearing* atau sobek namun belum mengalami patahan. Begitu pula dengan gambar b yaitu sampel FLE/9/T dengan gambar diambil dari posisi samping spesimen. Nampak jelas bahwa patahan yang terjadi berserabut, menyerupai pola patahan material ulet. Terlihat pula bahwa lapisan – lapisan hasil cetak penyusun geometri sampel mulai tertekan dan keluar dari susunan tumpukan awalnya.



Gambar 4.24 Hasil SEM perbesaran 100x sampel uji bending
(a)FLE/K, (b)FLE/9/T, (c)FLE/9/H

Kemudian sampel FLE/9/H memiliki pola patahan yang hampir sama dengan foto mikro hasil patahan sampel uji tarik, hanya saja lapisan – lapisan yang tertarik lebih halus dan tipis.

Gambar 4.25 menampilkan foto mikro yang sama dengan gambar 4.24 pada perbesaran 200x. Sampel kontrol terlihat sobek namun belum patah. Sedangkan sampel *honeycomb* terlihat jelas arah perambatan *cracknya* diawali dari daerah tekan pada bagian permukaan atas spesimen.



Gambar 4.25 Hasil SEM perbesaran 200x sampel uji bending
(a)FLE/K, (b)FLE/9/T, (c)FLE/9/H

Merujuk pada hasil pengujian tersebut, dapat dianalisis bahwa benar variasi internal geometri berpengaruh terhadap kekuatan lentur sampel uji bending. Uji bending sampel dengan variasi internal geometri ini menjelaskan interaksi antar lapisan yang terbentuk dengan perbedaan ukuran geometri memberikan kemampuan menerima beban yang berbeda pula (Nanya Li, 2016). Interaksi antar lapisan sampel dengan ukuran geometri 9 mm lebih baik dari sampel dengan ukuran geometri 4,5 mm karena antar lapisannya terbentuk dengan baik dan dapat saling menguatkan (Nanya Li, 2016).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data pada penelitian ini, didapatkan kesimpulan antara lain :

1. Parameter proses pencetakan objek 3D dengan variasi internal geometri *triangle* dan *honeycomb* menggunakan *filament polylactic acid* telah sesuai dengan kriteria cetak material *polylactic acid*.
2. Pengaruh internal geometri material *polylactic acid* yang dipreparasi menggunakan mesin 3D *Printer* :
 - Perbedaan internal geometri *triangle* dan *honeycomb* berpengaruh pada proses cetak objek tiga dimensi material *polylactic acid* dengan parameter cetak yang sama.
 - Perbedaan internal geometri *triangle* dan *honeycomb* hasil cetak menggunakan mesin 3D *Printer* berpengaruh pada kekuatan tarik dan bending material *polylactic acid* .
 - Internal geometri dengan sifat mekanik terbaik adalah geometri *triangle*.
3. Pengaruh rasio ketebalan terhadap ketinggian internal geometri *polylactic acid* :
 - Perbedaan rasio ketebalan dari masing – masing internal geometri berpengaruh pada *layering* objek saat pencetakan menggunakan mesin 3D *Printer* berlangsung.
 - Rasio ketebalan terhadap ketinggian (jarak) antar internal geometri berpengaruh terhadap kekuatan tarik dan bending dari objek hasil cetak menggunakan mesin 3D *Printer*.
 - Rasio ketebalan (jarak) antar geometri terbaik adalah 2 mm untuk objek dengan internal geometri *triangle* dan *honeycomb*.



5.2 Saran

1. Jenis printer komersial yang digunakan adalah produk original yang dikeluarkan dari pabrik dan memiliki pengaturan dalam bahasa Inggris.
2. Penentuan parameter cetak ditentukan dari percobaan yang dilakukan secara berulang agar dapat ditentukan parameter yang benar – benar cocok untuk berbagai geometri objek.
3. Jenis *bed printer* yang digunakan harus cocok dengan jenis *filament* yang digunakan untuk mencetak objek tiga dimensi.
4. Terlebih dahulu melakukan simulasi pengujian pada objek tiga dimensi yang akan dicetak.

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 2000. *ASTM D 638 : Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM International.
 - _____. 2000. *ASTM D 790 : Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. ASTM International.
 - _____. 2016. *Polylactic Acid*.
<http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide>. 18 Desember 2016.
 - _____. 2017. *PLA Physical Propertie*.
http://www.botfeeder.net/pla_material.htm. 17 Januari 2017.
- Amin, Zulkifli. 2007. *Rapid Prototyping Teknologi : Aplikasi pada Bidang Medis*. Padang : Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas.
- Angel R. Torrado, Corey M. Shemelya, Joel D. English, Yirong Lin, Ryan B. Wicker, David A. Roberson, “*Characterizing The Effect of Additives to ABS on The Mechanical Property Anisotropy of Specimens Fabricated by Materials Extrusion 3D Printing*,” Additive Manufacturing 6, 16 – 29, 2016.
- Arghavan Farzadi, “*Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous prototypes in bone tissue engineering*,” Ceramic International 41, 8320 – 8330, 2015.
- Arifianto. 2008. *Analisis Karakteristik Termal pada Kabel Berisolasi dan Berselubung PVC Tegangan Pengenal 300/500 Volt*. Depok : Departemen Elektro FT-UI.
- Ben Ezair, Fady Massarwi, Gershon Elber, “*Orientation Analysis of 3D Objects Toward Minimal support Volume in 3D Printing*,” Computers & Graphics 51, 117–124, 2015.
- B. Satyanarayana, Kode Jaya Prakash, “*Component Replication using 3D Printing Technology*,” Procedia Materials Science 10, 263 – 269, 2015.

- Callister, William, J. 2001. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Chun Lu, Mingyue Zhao, Liu Jie, Jing Wang, Yu Gao, Xu Cui, Ping Chen, “*Stress Distribution on Composite Honeycomb Sandwich Structure suffered from Bending Load,*” *Procedia Engineering* 99, 405 – 412, 2015.
- Clayson C. Spackman, Christopher R. Frank, Kyle C. Picha, Johnson Samuel, “*3D Printing of Fiber-reinforced Soft Composites: Process Study and Material Characterization,*” *Journal of Manufacturing Processes* 23, 296 – 305, 2016.
- F.S. Senatov, K.V. Niaza, M.Yu. Zadarozhnyy, A.V. Maksimkin, “*Mechanical Properties and Shape Memory Effect of 3D Printed PLA-based porous scaffold,*” *Journal of The Mechanical Behaviour of Biomedical Materials* 57, 139 148, 2016.
- George Socrates. 2001. *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies, Tables and Charts, Third Edition*. England : John Wiley & Sons Ltd.
- Gurr, M. 2016. *Rapid Prototyping*. Jerman : Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg.
- Helena N. Chia, Benjamin M. Wu, “*Recent Advances in 3D Printing of Biomaterials,*” *Journal of Biological Engineering*, 2015.
- Izabela Hager, Anna Golonka, roman Putanowicz, “*3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction.*” *Procedia Engineering* 151, 292 – 299, 2016.
- Kholil, ahmad. 2008. *Pengembangan Laser Trajectory Proses Rapid Prototyping untuk Produk Berkontur dan Prismatic*. Depok : Pascasarjana FT-UI.
- Li, Nanya, Li, Yingguang, Liu, Shuting, “*Rapid Prototyping of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites by 3D Printing,*” *Journal of Materials Processing Technology*, 2016.

- Lubis, Sobron. 2014. *Pengaturan Orientasi Posisi Objek pada Proses Rapid Prototyping Menggunakan 3D Printer Terhadap Waktu Proses dan Kualitas Produk*. Jakarta : Universitas Tarumanegara.
- Lubis, Sobron. 2016. *Pengaruh Orientasi Objek pada Proses 3D Printing Bahan Polymer PLA dan ABS terhadap Kekuatan Tarik dan Ketelitian Dimensi Produk*. Jakarta : Universitas Tarumanegara.
- Ludmila Navakova-Marcincinova “Application of Fused Deposition Modelling Technology in 3D Printing Rapid Prototyping Area,” *Manufactur and Industrial Engineering* 11(4), 2012.
- L. M. Galantucci, I. Bodi, J. Kacani, F. Lavecchia, “analysis of dimensional Performance for a 3D Open-source Printer Based on Fused Deposition Modeling Technique,” *Procedia CIRP* 28, 82 – 87, 2015.
- Melenka, Garret W., Cheung B.K.O., Schofield, J.S., Dawson, M.R., Carey, J.P., “Evaluation and Prediction of the Tensile Properties of Continuous Fiber-Reinforced 3D Printed Structures,” *Composites Structure* 153, 866 875, 2016.
- Mujiarto, Iman. 2005. *Sifat dan Karakteristik Material Plastik dan Bahan Aditif*. Semarang : AMNI.
- O.S. Carneiro, A.F. Silva, R. Gomes, “Fused Deposition Modeling with Polypropylene,” *Materials and Design Journal*, 768 776, 2015.
- Riyanto, Rakhman Rio. 2016. *Proses Pelapisan Permukaan Spesimen dari Bahan ABS yang Dibentuk Melalui Rapid Tooling*. Surakarta : Jurusan Teknik Mesin, UMS.
- Saptono, Rahmat. 2008. *Pengetahuan Bahan Polimer*. Depok : Departemen Metalurgi dan Material FT-UI.
- Shady Farah, daneil G., Anderson, robert Langer, “Physical and Mechanical Properties of PLA, and their Functions in Widespread Applications - a Comprehensive Review,” *Advanced Drug delivery reviews*, 2016.

- Simon R.G. Bates, Ian R. Farrow, Richard S. Trask, “*3D Printed Polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption,*” *Materials and Design Journal*, 172 – 183, 2016.
- Syed H. Masood, “*Intelligent Rapid Prototyping with Fused Deposition Modelling,*” *Rapid Prototyping Journal* Vol. 2, pp.24-33, 1996.
- Shah, Vishu. 1998. *Handbook of Plastics Testing 2nd Edition*. USA : John Wiley & Sons Inc.
- Stefan Junk, “*Review of Open Source and Freeware CAD Systems for Use with 3D Printing,*” 26th CIRP Design Conference, 2016.
- Sujito, Hanim Munawaroh, Endhah Purwandari, “*Mechanical Properties and Biodegradability of Poly Lactic Acid Biocomposites Reinforced with Bamboo and Sengon Wood Thin Sheets,*” *Jurnal Ilmu Dasar*, Vol 14, 67 – 72, 2 Juli 2013.
- Tao Peng, “*Analysis of energy Utilization in 3D Printing Processes,*” *Procedia CIRP* 40, 62 – 67, 2016.
- Tomislav Galeta, Pero Raos, Josip Stojic, Ivana Paksi, “*Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects,*” *Procedia Engineering* 149, 100 – 104, 2016.
- Tomo, Hendro Sat Setijo. 2010. *Karakteristik Sifat Mekanik dan elektrik Pelat Bipolar Sel Bahan Bakar Berkarbon Grafit dalam Matriks Polimer ABS*. Depok : FMIPA UI.
- Victor H. Orozco, Witold Brostow, Wunpen Chonkaew, Betty L. Lopez, “*Preparation and Characterization of Polylactic Acid-g-Maleic Anhydride + Starch Blends,*” *Macromolecules Symposium*, 69 – 80, 2009.
- V.S. Giita Silverajah, Nor Azowa Ibrahim, Norhazlin zainuddin, “*Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Polylactic Acid/Epoxidized Palm Olein Blend,*” *Molecules*, 17, 1729 – 1747, 2012.
- Zixiang Weng, Jianlei Wang, T. Senthil, Lixin Wu, “*Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D*

printing,” Materials and design 102, 276 – 283, 2016.
doi:10.1016/j.matdes.2016.04.045

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Spesifikasi *Filament Polylactic Acid PLA*

Tabel L1. 1 *PLA Filament Properties*

Produsen : Botfeeder, Taiwan			
Property	Test Method	Units	Test Value
Density	D1505	g/cc	1,24
Tensile Strength	D882	KPsi	15 – 21
Tensile Modulus	D882	KPsi	500 – 550
Elongation at Break	D882	%	180 – 100
Melting Point	D3418	°C	155 – 170
Glass Transition Temperature	-	°C	55 – 60

(all properties measured on 1 mm film)

Lampiran 2 : Prosedur Kerja Mesin 3D Printer Prusa i3

1. Desain tiga dimensi format *.stl* dari *software* Inventor diverivikasi dan dibuatkan dokumen *.gcode* nya menggunakan *software* Slic3r atau program yang sejenis
2. Membuka aplikasi Cura kemudian input file desain *.stl* dan dokumen *.gcode*.
3. Mengatur parameter pencetakan pada *menu basic* dan *advance*.
4. Melakukan pre *heat* pada *bed* dan *nozzle* mesin 3D Printer.
5. Mulai mencetak sampel objek 3D.

Lampiran 3 : Prosedur Pengujian

1. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan menggunakan alat universal testing dengan standar ASTM D638 Tipe 1. Nilai kekuatan tarik, regangan, dan modulus dihitung menggunakan persamaan 1 – 3.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots(1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \dots\dots\dots(2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(3)$$

- σ = stress (MPa)
- A_o = cross section area (mm²)
- P = load (N)
- ε = strain (mm/mm)
- ΔL = elongation (mm)
- L_o = initial length (mm)
- b = width of beam (mm)
- E = tensile modulus (MPa)

2. Pengujian Bending

Pengujian fleksural yang dilakukan menggunakan alat *3-point bending*. Pengujian ini dilakukan dengan standar pengujian ASTM D790. Dimensi spesimen yang digunakan adalah 127x12,7x3,2 mm dengan *support span* sebesar 100 mm. Untuk mendapatkan nilai *flexural strength* dan *flexural modulus* menggunakan 3 persamaan yaitu :

$$S = \left(\frac{3 P L}{2 b d^2} \right) \dots\dots\dots(4)$$

$$E = \frac{L^3 m}{4 b d^3} \dots\dots\dots(5)$$

$$r = \frac{3 D d}{L^2} \dots\dots\dots(6)$$

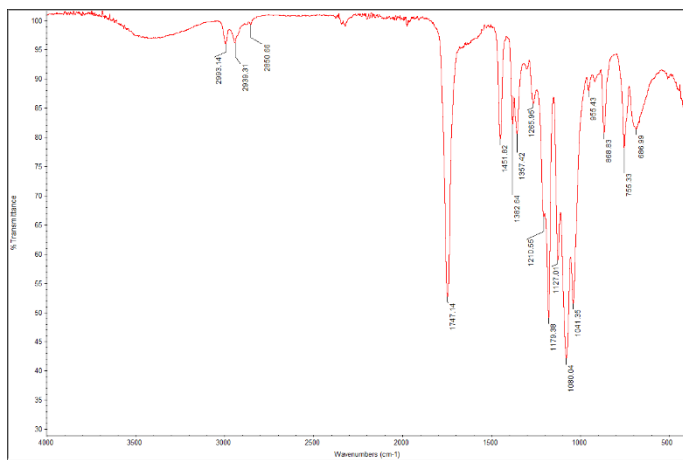
Keterangan :

- D = *midspan deflection* (mm)
- r = *strain* (mm/mm)
- L = *support span* (mm)
- d = *depth of beam* (mm)
- S = *flexural strength* (MPa)

P = load (N)
 b = width of beam (mm)
 E = flexural modulus (MPa)
 m = load deflection ratio (N/mm)

Lampiran 4 : Hasil Pengujian

1. Pengujian FTIR : *Filament PLA*



Gambar L4. 1 Spektrum infra merah *filament poly(lactic acid)*

Lampiran 4 : Hasil Pengujian

1. Perhitungan massa dan volume sampel

Tabel L4. 1 Massa dan volume sampel uji tarik dan uji bending

Pengujian	Tarik					Bending				
Kode Spesimen	Massa (gr)	Rataan Massa (gr)	Error	ρ (gr/cm ³)	Volume (cm ³)	Massa (gr)	Rataan Massa (gr)	Error	ρ (gr/cm ³)	Volume (cm ³)
TEN/K	13,0047	13,0080	0,0047	1,25	10406,4	6,7022	6,6988	0,0049	1,25	5359
	13,0113					6,6953				
TEN/4,5T	6,9952	7,4146	0,5931	1,25	5931,68	3,989	3,9621	0,0380	1,25	3169,68
	7,834					3,9352				
TEN/4,5H	6,2266	6,0758	0,2133	1,25	4860,64	3,1336	3,1323	0,0019	1,25	2505,8
	5,925					3,1309				
TEN/9,0T	7,9244	7,9243	0,0001	1,25	6339,44	4,1091	4,1038	0,0075	1,25	3283,04
	7,9242					4,0985				
TEN/9,0H	7,6299	7,8197	0,2683	1,25	6255,72	3,7265	3,7216	0,0070	1,25	2977,24
	8,0094					3,7166				

2. Pengujian Tarik

Tabel L4. 2 Data hasil uji tarik

Kode Spesimen	Stress					
	F (N)	Rataan F (N)	A _o (mm ²)	σ (MPa)	Std Dev	Rataan σ (MPa)
TEN/K	2657,6022	2647,7955	52	51,1077	0,2667	50,9191
	2637,9889		52	50,7306		
TEN/4,5/T	887,5018	891,4245	16	55,4689	0,3467	55,7140
	895,3471		16	55,9592		
TEN/4,5/H	715,8855	730,5954	16	44,7428	1,3002	45,6622
	745,3054		16	46,5816		
TEN/9/T	956,1484	948,7934	16	59,7593	0,6501	59,2996
	941,4384		16	58,8399		
TEN/9/H	862,9852	848,2752	16	53,9366	1,3002	53,0172
	833,5653		16	52,0978		

Kode Spesimen	Strain					
		L _o (mm)	ε _z	Std Dev	Rataan ε _z	% ε _z
TEN/K	7,15	57	0,1254	0,0016127	0,1266	12,6579
	7,28	57	0,1277			
TEN/4,5/T	6,42	57	0,1126	0,00260513	0,1108	11,0789
	6,21	57	0,1089			
TEN/4,5/H	5,72	57	0,1004	0,000992431	0,1011	10,1053
	5,8	57	0,1018			
TEN/9/T	6,22	57	0,1091	0,003473507	0,1067	10,6667
	5,94	57	0,1042			
TEN/9H	5,62	57	0,0986	0,002232969	0,1002	10,0175
	5,8	57	0,1018			

3. Pengujian Bending

Tabel L4. 3 Data hasil uji bending

Kode Spesimen	P (N)	Ao (mm ²)	L (mm)	b (mm)	d (mm)	D (mm)	m (N/mm)
FLE/K	79,9242	1300	100	13	3,2	20,37	3,9236
	77,6687	1300	100	13	3,2	20,35	3,8166
FLE/4,5/T	25,9876	1300	100	4	3,2	25,20	1,0313
	24,5166	1300	100	4	3,2	25,80	0,9503
FLE/4,5/H	19,6133	1300	100	4	3,2	27,46	0,7142
	17,8481	1300	100	4	3,2	27,22	0,6557
FLE/9/T	34,8136	1300	100	4	3,2	16,00	2,1759
	32,3619	1300	100	4	3,2	16,17	2,0014
FLE/9/H	25,9876	1300	100	4	3,2	16,39	1,5856
	24,8108	1300	100	4	3,2	16,51	1,5028
Kode Spesimen	σ (MPa)	Std Dev	Rataan	ϵ	Std Dev	Rataan	% ϵ
FLE/K	90,0588	1,7971	88,7880	0,0391	0,0000	0,0391	3,9091
	87,5173			0,0391			
FLE/4,5/T	95,1695	3,8092	92,4760	0,0484	0,0008	0,0490	4,8960
	89,7826			0,0495			
FLE/4,5/H	71,8260	4,5710	68,5939	0,0527	0,0003	0,0525	5,2493
	65,3617			0,0523			
FLE/9/T	127,4912	6,3486	123,0021	0,0307	0,0002	0,0309	3,0883
	118,5130			0,0310			
FLE/9/H	95,1695	3,0473	93,0147	0,0315	0,0002	0,0316	3,1584
	90,8600			0,0317			

PLA Material ❖ Learning Center

PLA Mate

PLA is the abbreviation for Poly Lactic Acid or Polylactic acid, which is derived from starch or carbohydrate through corn, beet, wheat, or other natural sources. The production process such as fermenting, dehydrating, and the resulting PLA is nontoxic, and is contamination-free throughout the production process. Since the ingredients are biodegradable, the practice of PLA is in line with the ideal of cycles of nature, PLA is truly an environmentally friendly substance.

The specific PLA resins we are currently using in filaments print is manufactured by NatureWorks LLC, as it is one of the most popular and highest grade amongst users in the home-use 3D printers community. It is a better option for beginners as well, since lots of feedback bas

[ABOUT US](#)[3D FILAMENT](#)[FAQ](#)[CONTACT](#)

PLA Physical Properties

Due to PLA's excellent mechanical and physical properties it is suitable for different products of applications, including injection molding, blow molding, transparent film, adhesive film and all kinds of plastic products dedicated to industrial and

Properties	Test Method
Density	D1505
Tensile Strength	D882
Tensile Modulus	D882
Elongation at Break	D882
Elmendorf Tear	D1922
Melting Point	D3418
Glass Transition Temperature	-

(All properties measured on 1.0 mil film.)

[About Us](#)[Features](#)[Info Center](#)[FAQ](#)[Contact Us](#)

LIING SHIAN COLORANT MANUFACTURER
CO., LTD.

No.1100, Zhenxing Rd., Guishan Dist.,

Taoyuan City 333, Taiwan

Tel: +886-3-3198060 , 3198061

[ABOUT US](#)

[3D FILAMENT](#)

[FAQ](#)

[CON*](#)

Copyright © 2015 BotFeeder. All rights reserved

MakeItFrom.comFind **and** Compare

Polylactic Acid (PLA, Polylactide)

PLA is a **thermoplastic** material, further classified as a **polyester plastic**.

Material Properties

Density: 1.3 g/cm³ (81 lb/ft³)

Elastic (Young's, Tensile) Modulus: 3.5 GPa (0.51 x 10⁶ psi)

Elongation at Break: 6.0 %

Flexural Modulus: 4.0 GPa (0.58 x 10⁶ psi)

Flexural Strength: 80 MPa (12 x 10³ psi)

Glass Transition Temperature: 60 °C (140 °F)

Heat Deflection Temperature At 455 kPa (66 psi): 65 °C (150 °F)

Melting Onset (Solidus): 160 °C (320 °F)

Shear Modulus: 2.4 GPa (0.35 x 10⁶ psi)

Specific Heat Capacity: 1800 J/kg-K

Strength to Weight Ratio: 38 kN-m/kg

Tensile Strength: Ultimate (UTS): 50 MPa (7.3×10^3 psi)

Thermal Conductivity: 0.13 W/m-K

Thermal Diffusivity: 0.056 m²/s

The length of each bar compares the given value to the highest value in the database.

Followup Questions

How are the material properties defined?

How does PLA compare to other thermoplastics?

How does it compare to other polymeric materials?

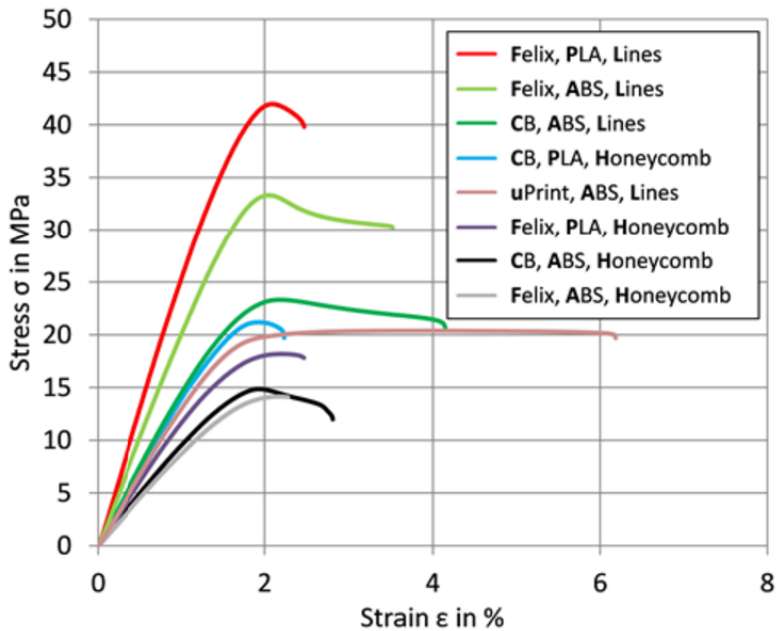
Further Reading

Modern Plastics Handbook, Charles A. Harper (editor), 1999

Plastics Materials, 7th ed., J. A. Brydson, 1999

SPI Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc., 5th ed., Michael L. Berins (editor), 2000

Copyright 2009-16: [Disclaimer and Terms](#). Last updated on 2016-08-06.



Gambar L. 2 Hasil uji tarik sampel material ABS dan PLA menggunakan jenis printer Felix, uPrint, dan CB (Enno Ebel, 2014)



Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D790; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the determination of flexural properties of unreinforced and reinforced plastics, including high-modulus composites and electrical insulating materials in the form of rectangular bars molded directly or cut from sheets, plates, or molded shapes. These test methods are generally applicable to both rigid and semirigid materials. However, flexural strength cannot be determined for those materials that do not break or that do not fail in the outer surface of the test specimen within the 5.0 % strain limit of these test methods. These test methods utilize a three-point loading system applied to a simply supported beam. A four-point loading system method can be found in Test Method [D6272](#).

1.1.1 *Procedure A*, designed principally for materials that break at comparatively small deflections.

1.1.2 *Procedure B*, designed particularly for those materials that undergo large deflections during testing.

1.1.3 Procedure A shall be used for measurement of flexural properties, particularly flexural modulus, unless the material specification states otherwise. Procedure B may be used for measurement of flexural strength only. Tangent modulus data obtained by Procedure A tends to exhibit lower standard deviations than comparable data obtained by means of Procedure B.

1.2 Comparative tests may be run in accordance with either procedure, provided that the procedure is found satisfactory for the material being tested.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values provided in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appro-*

priate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

NOTE 1—These test methods are not technically equivalent to [ISO 178](#).

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

- [D618](#) Practice for Conditioning Plastics for Testing
- [D638](#) Test Method for Tensile Properties of Plastics
- [D883](#) Terminology Relating to Plastics
- [D4000](#) Classification System for Specifying Plastic Materials
- [D4101](#) Specification for Polypropylene Injection and Extrusion Materials
- [D5947](#) Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens
- [D6272](#) Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending
- [E4](#) Practices for Force Verification of Testing Machines
- [E691](#) Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 ISO Standard:³

- [ISO 178](#) Plastics—Determination of Flexural Properties

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions of terms applying to these test methods appear in Terminology [D883](#) and Annex A1 of Test Method [D638](#).

4. Summary of Test Method

4.1 A bar of rectangular cross section rests on two supports and is loaded by means of a loading nose midway between the supports. A support span-to-depth ratio of 16:1 shall be used unless there is reason to suspect that a larger span-to-depth

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee [D20](#) on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee [D20.10](#) on Mechanical Properties.

Current edition approved April 1, 2010. Published April 2010. Originally approved in 1970. Last previous edition approved in 2007 as D790 – 07 ^{ε1}. DOI: 10.1520/D0790-10.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

ratio may be required, as may be the case for certain laminated materials (see Section 7 and Note 7 for guidance).

4.2 The specimen is deflected until rupture occurs in the outer surface of the test specimen or until a maximum strain (see 12.7) of 5.0 % is reached, whichever occurs first.

4.3 Procedure A employs a strain rate of 0.01 mm/mm/min (0.01 in./in./min) and is the preferred procedure for this test method, while Procedure B employs a strain rate of 0.10 mm/mm/min (0.10 in./in./min).

5. Significance and Use

5.1 Flexural properties as determined by these test methods are especially useful for quality control and specification purposes.

5.2 Materials that do not fail by the maximum strain allowed under these test methods (3-point bend) may be more suited to a 4-point bend test. The basic difference between the two test methods is in the location of the maximum bending moment and maximum axial fiber stresses. The maximum axial fiber stresses occur on a line under the loading nose in 3-point bending and over the area between the loading noses in 4-point bending.

5.3 Flexural properties may vary with specimen depth, temperature, atmospheric conditions, and the difference in rate of straining as specified in Procedures A and B (see also Note 7).

5.4 Before proceeding with these test methods, reference should be made to the ASTM specification of the material being tested. Any test specimen preparation, conditioning, dimensions, or testing parameters, or combination thereof, covered in the ASTM material specification shall take precedence over those mentioned in these test methods. Table 1 in Classification System D4000 lists the ASTM material specifications that currently exist for plastics.

6. Apparatus

6.1 *Testing Machine*— A properly calibrated testing machine that can be operated at constant rates of crosshead motion over the range indicated, and in which the error in the load measuring system shall not exceed ± 1 % of the maximum load expected to be measured. It shall be equipped with a deflection measuring device. The stiffness of the testing machine shall be

such that the total elastic deformation of the system does not exceed 1 % of the total deflection of the test specimen during testing, or appropriate corrections shall be made. The load indicating mechanism shall be essentially free from inertial lag at the crosshead rate used. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E4.

6.2 *Loading Noses and Supports*—The loading nose and supports shall have cylindrical surfaces. The default radii of the loading nose and supports shall be 5.0 ± 0.1 mm (0.197 ± 0.004 in.) unless otherwise specified in an ASTM material specification or as agreed upon between the interested parties. When the use of an ASTM material specification, or an agreed upon modification, results in a change to the radii of the loading nose and supports, the results shall be clearly identified as being obtained from a modified version of this test method and shall include the specification (when available) from which the modification was specified, for example, Test Method D790 in accordance with Specification D4101.

6.2.1 *Other Radii for Loading Noses and Supports*—When other than default loading noses and supports are used, in order to avoid excessive indentation, or failure due to stress concentration directly under the loading nose, they must comply with the following requirements: they shall have a minimum radius of 3.2 mm ($\frac{1}{8}$ in.) for all specimens. For specimens 3.2 mm or greater in depth, the radius of the supports may be up to 1.6 times the specimen depth. They shall be this large if significant indentation or compressive failure occurs. The arc of the loading nose in contact with the specimen shall be sufficiently large to prevent contact of the specimen with the sides of the nose. The maximum radius of the loading nose shall be no more than four times the specimen depth.

6.3 *Micrometers*— Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semirigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of nonrigid test specimens shall have: a contact measuring pressure of 25 ± 2.5 kPa (3.6 ± 0.36 psi), a movable circular contact foot 6.35 ± 0.025 mm (0.250 ± 0.001 in.) in diameter and a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.005 mm (0.002 in.) over the entire foot area. Flatness of foot and anvil shall conform to the portion of the Calibration section of Test Methods D5947.

7. Test Specimens

7.1 The specimens may be cut from sheets, plates, or molded shapes, or may be molded to the desired finished dimensions. The actual dimensions used in Section 4.2, Calculation, shall be measured in accordance with Test Methods D5947.

NOTE 2—Any necessary polishing of specimens shall be done only in the lengthwise direction of the specimen.

7.2 *Sheet Materials (Except Laminated Thermosetting Materials and Certain Materials Used for Electrical Insulation, Including Vulcanized Fiber and Glass Bonded Mica)*:

TABLE 1 Flexural Strength

Material	Mean, 10^3 psi	Values Expressed in Units of % of 10^3 psi			
		V_r^A	V_R^B	r^C	R^D
ABS	9.99	1.59	6.05	4.44	17.2
DAP thermoset	14.3	6.58	6.58	18.6	18.6
Cast acrylic	16.3	1.67	11.3	4.73	32.0
GR polyester	19.5	1.43	2.14	4.05	6.08
GR polycarbonate	21.0	5.16	6.05	14.6	17.1
SMC	26.0	4.76	7.19	13.5	20.4

^A V_r = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories: $S_r = [((s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_n)^2)/n]^{1/2}$ then $V_r = (S_r \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$.

^B V_R = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation: $S_R = \{S_r^2 + S_L^2\}^{1/2}$ where S_L is the standard deviation of laboratory means. Then: $V_R = (S_R \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$.

^C r = within-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times V_r$.

^D R = between-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times V_R$.

7.2.1 Materials 1.6 mm ($\frac{1}{16}$ in.) or Greater in Thickness—For flatwise tests, the depth of the specimen shall be the thickness of the material. For edgewise tests, the width of the specimen shall be the thickness of the sheet, and the depth shall not exceed the width (see Notes 3 and 4). For all tests, the support span shall be 16 (tolerance ± 1) times the depth of the beam. Specimen width shall not exceed one fourth of the support span for specimens greater than 3.2 mm ($\frac{1}{8}$ in.) in depth. Specimens 3.2 mm or less in depth shall be 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ in.) in width. The specimen shall be long enough to allow for overhanging on each end of at least 10 % of the support span, but in no case less than 6.4 mm ($\frac{1}{4}$ in.) on each end. Overhang shall be sufficient to prevent the specimen from slipping through the supports.

NOTE 3—Whenever possible, the original surface of the sheet shall be unaltered. However, where testing machine limitations make it impossible to follow the above criterion on the unaltered sheet, one or both surfaces shall be machined to provide the desired dimensions, and the location of the specimens with reference to the total depth shall be noted. The value obtained on specimens with machined surfaces may differ from those obtained on specimens with original surfaces. Consequently, any specifications for flexural properties on thicker sheets must state whether the original surfaces are to be retained or not. When only one surface was machined, it must be stated whether the machined surface was on the tension or compression side of the beam.

NOTE 4—Edgewise tests are not applicable for sheets that are so thin that specimens meeting these requirements cannot be cut. If specimen depth exceeds the width, buckling may occur.

7.2.2 Materials Less than 1.6 mm ($\frac{1}{16}$ in.) in Thickness—The specimen shall be 50.8 mm (2 in.) long by 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ in.) wide, tested flatwise on a 25.4-mm (1-in.) support span.

NOTE 5—Use of the formulas for simple beams cited in these test methods for calculating results presumes that beam width is small in comparison with the support span. Therefore, the formulas do not apply rigorously to these dimensions.

NOTE 6—Where machine sensitivity is such that specimens of these dimensions cannot be measured, wider specimens or shorter support spans, or both, may be used, provided the support span-to-depth ratio is at least 14 to 1. All dimensions must be stated in the report (see also Note 5).

7.3 Laminated Thermosetting Materials and Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation, Including Vulcanized Fiber and Glass-Bonded Mica—For paper-base and fabric-base grades over 25.4 mm (1 in.) in nominal thickness, the specimens shall be machined on both surfaces to a depth of 25.4 mm. For glass-base and nylon-base grades, specimens over 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ in.) in nominal depth shall be machined on both surfaces to a depth of 12.7 mm. The support span-to-depth ratio shall be chosen such that failures occur in the outer fibers of the specimens, due only to the bending moment (see Note 7). Therefore, a ratio larger than 16:1 may be necessary (32:1 or 40:1 are recommended). When laminated materials exhibit low compressive strength perpendicular to the laminations, they shall be loaded with a large radius loading nose (up to four times the specimen depth to prevent premature damage to the outer fibers).

7.4 Molding Materials (Thermoplastics and Thermosets)—The recommended specimen for molding materials is 127 by 12.7 by 3.2 mm (5 by $\frac{1}{2}$ by $\frac{1}{8}$ in.) tested flatwise on a support span, resulting in a support span-to-depth ratio of 16 (tolerance

± 1). Thicker specimens should be avoided if they exhibit significant shrink marks or bubbles when molded.

7.5 High-Strength Reinforced Composites, Including Highly Orthotropic Laminates—The span-to-depth ratio shall be chosen such that failure occurs in the outer fibers of the specimens and is due only to the bending moment (see Note 7). A span-to-depth ratio larger than 16:1 may be necessary (32:1 or 40:1 are recommended). For some highly anisotropic composites, shear deformation can significantly influence modulus measurements, even at span-to-depth ratios as high as 40:1. Hence, for these materials, an increase in the span-to-depth ratio to 60:1 is recommended to eliminate shear effects when modulus data are required, it should also be noted that the flexural modulus of highly anisotropic laminates is a strong function of ply-stacking sequence and will not necessarily correlate with tensile modulus, which is not stacking-sequence dependent.

NOTE 7—As a general rule, support span-to-depth ratios of 16:1 are satisfactory when the ratio of the tensile strength to shear strength is less than 8 to 1, but the support span-to-depth ratio must be increased for composite laminates having relatively low shear strength in the plane of the laminate and relatively high tensile strength parallel to the support span.

8. Number of Test Specimens

8.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials or molded specimens.

8.2 For each sample of anisotropic material in sheet form, test at least five specimens for each of the following conditions. Recommended conditions are flatwise and edgewise tests on specimens cut in lengthwise and crosswise directions of the sheet. For the purposes of this test, “lengthwise” designates the principal axis of anisotropy and shall be interpreted to mean the direction of the sheet known to be stronger in flexure. “Crosswise” indicates the sheet direction known to be the weaker in flexure and shall be at 90° to the lengthwise direction.

9. Conditioning

9.1 *Conditioning*—Condition the test specimens in accordance with Procedure A of Practice D618 unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Conditioning time is specified as a minimum. Temperature and humidity tolerances shall be in accordance with Section 7 of Practice D618 unless specified differently by contract or material specification.

9.2 *Test Conditions*—Conduct the tests at the same temperature and humidity used for conditioning with tolerances in accordance with Section 7 of Practice D618 unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification.

10. Procedure

10.1 Procedure A:

10.1.1 Use an untested specimen for each measurement. Measure the width and depth of the specimen to the nearest 0.03 mm (0.001 in.) at the center of the support span. For specimens less than 2.54 mm (0.100 in.) in depth, measure the depth to the nearest 0.003 mm (0.0005 in.). These measurements shall be made in accordance with Test Methods D5947.

10.1.2 Determine the support span to be used as described in Section 7 and set the support span to within 1 % of the determined value.

10.1.3 For flexural fixtures that have continuously adjustable spans, measure the span accurately to the nearest 0.1 mm (0.004 in.) for spans less than 63 mm (2.5 in.) and to the nearest 0.3 mm (0.012 in.) for spans greater than or equal to 63 mm (2.5 in.). Use the actual measured span for all calculations. For flexural fixtures that have fixed machined span positions, verify the span distance the same as for adjustable spans at each machined position. This distance becomes the span for that position and is used for calculations applicable to all subsequent tests conducted at that position. See Annex A2 for information on the determination of and setting of the span.

10.1.4 Calculate the rate of crosshead motion as follows and set the machine for the rate of crosshead motion as calculated by Eq 1:

$$R = ZL^2/6d \quad (1)$$

where:

R = rate of crosshead motion, mm (in.)/min,

L = support span, mm (in.),

d = depth of beam, mm (in.), and

Z = rate of straining of the outer fiber, mm/mm/min (in./in./min). Z shall be equal to 0.01.

In no case shall the actual crosshead rate differ from that calculated using Eq 1, by more than ± 10 %.

10.1.5 Align the loading nose and supports so that the axes of the cylindrical surfaces are parallel and the loading nose is midway between the supports. The parallelism of the apparatus may be checked by means of a plate with parallel grooves into which the loading nose and supports will fit when properly aligned (see A2.3). Center the specimen on the supports, with the long axis of the specimen perpendicular to the loading nose and supports.

10.1.6 Apply the load to the specimen at the specified crosshead rate, and take simultaneous load-deflection data. Measure deflection either by a gage under the specimen in contact with it at the center of the support span, the gage being mounted stationary relative to the specimen supports, or by measurement of the motion of the loading nose relative to the supports. Load-deflection curves may be plotted to determine the flexural strength, chord or secant modulus or the tangent modulus of elasticity, and the total work as measured by the area under the load-deflection curve. Perform the necessary toe compensation (see Annex A1) to correct for seating and indentation of the specimen and deflections in the machine.

10.1.7 Terminate the test when the maximum strain in the outer surface of the test specimen has reached 0.05 mm/mm (in./in.) or at break if break occurs prior to reaching the maximum strain (Notes 8 and 9). The deflection at which this strain will occur may be calculated by letting r equal 0.05 mm/mm (in./in.) in Eq 2:

$$D = rL^2/6d \quad (2)$$

where:

D = midspan deflection, mm (in.),

r = strain, mm/mm (in./in.),

L = support span, mm (in.), and

d = depth of beam, mm (in.).

NOTE 8—For some materials that do not yield or break within the 5 % strain limit when tested by Procedure A, the increased strain rate allowed by Procedure B (see 10.2) may induce the specimen to yield or break, or both, within the required 5 % strain limit.

NOTE 9—Beyond 5 % strain, this test method is not applicable. Some other mechanical property might be more relevant to characterize materials that neither yield nor break by either Procedure A or Procedure B within the 5 % strain limit (for example, Test Method D638 may be considered).

10.2 Procedure B:

10.2.1 Use an untested specimen for each measurement.

10.2.2 Test conditions shall be identical to those described in 10.1, except that the rate of straining of the outer surface of the test specimen shall be 0.10 mm/mm (in./in.)/min.

10.2.3 If no break has occurred in the specimen by the time the maximum strain in the outer surface of the test specimen has reached 0.05 mm/mm (in./in.), discontinue the test (see Note 9).

11. Retests

11.1 Values for properties at rupture shall not be calculated for any specimen that breaks at some obvious, fortuitous flaw, unless such flaws constitute a variable being studied. Retests shall be made for any specimen on which values are not calculated.

12. Calculation

12.1 Toe compensation shall be made in accordance with Annex A1 unless it can be shown that the toe region of the curve is not due to the take-up of slack, seating of the specimen, or other artifact, but rather is an authentic material response.

12.2 *Flexural Stress* (σ_f)—When a homogeneous elastic material is tested in flexure as a simple beam supported at two points and loaded at the midpoint, the maximum stress in the outer surface of the test specimen occurs at the midpoint. This stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by means of the following equation (see Notes 10-12):

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (3)$$

where:

σ = stress in the outer fibers at midpoint, MPa (psi),

P = load at a given point on the load-deflection curve, N (lbf),

L = support span, mm (in.),

b = width of beam tested, mm (in.), and

d = depth of beam tested, mm (in.).

NOTE 10—Eq 3 applies strictly to materials for which stress is linearly proportional to strain up to the point of rupture and for which the strains are small. Since this is not always the case, a slight error will be introduced if Eq 3 is used to calculate stress for materials that are not true Hookean materials. The equation is valid for obtaining comparison data and for specification purposes, but only up to a maximum fiber strain of 5 % in the outer surface of the test specimen for specimens tested by the procedures described herein.

NOTE 11—When testing highly orthotropic laminates, the maximum

stress may not always occur in the outer surface of the test specimen.⁴ Laminated beam theory must be applied to determine the maximum tensile stress at failure. If Eq 3 is used to calculate stress, it will yield an apparent strength based on homogeneous beam theory. This apparent strength is highly dependent on the ply-stacking sequence of highly orthotropic laminates.

NOTE 12—The preceding calculation is not valid if the specimen slips excessively between the supports.

12.3 Flexural Stress for Beams Tested at Large Support Spans (σ_f)—If support span-to-depth ratios greater than 16 to 1 are used such that deflections in excess of 10 % of the support span occur, the stress in the outer surface of the specimen for a simple beam can be reasonably approximated with the following equation (see Note 13):

$$\sigma_f = (3PL/2bd^2)[1 + 6(D/L)^2 - 4(d/L)(D/L)] \quad (4)$$

where:

σ_f , P , L , b , and d are the same as for Eq 3, and

D = deflection of the centerline of the specimen at the middle of the support span, mm (in.).

NOTE 13—When large support span-to-depth ratios are used, significant end forces are developed at the support noses which will affect the moment in a simple supported beam. Eq 4 includes additional terms that are an approximate correction factor for the influence of these end forces in large support span-to-depth ratio beams where relatively large deflections exist.

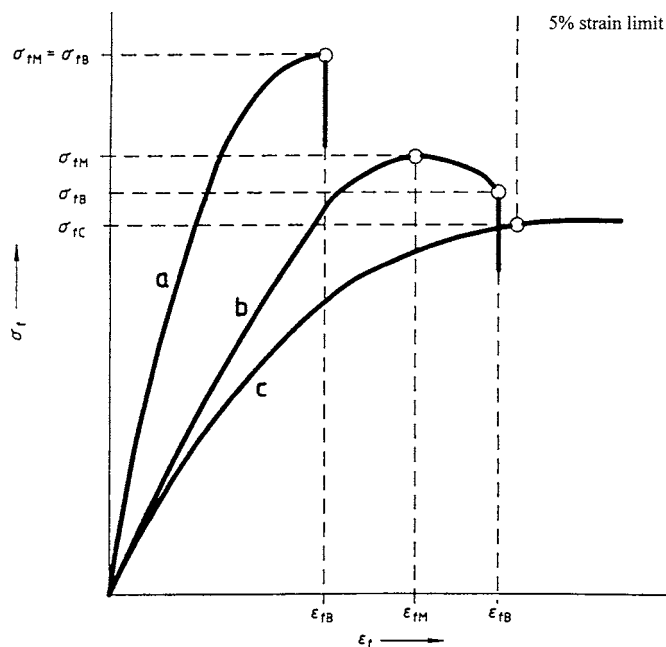
12.4 Flexural Strength (σ_{fM})—Maximum flexural stress sustained by the test specimen (see Note 11) during a bending test. It is calculated according to Eq 3 or Eq 4. Some materials that do not break at strains of up to 5 % may give a load deflection curve that shows a point at which the load does not increase with an increase in strain, that is, a yield point (Fig. 1, Curve B), Y . The flexural strength may be calculated for these materials by letting P (in Eq 3 or Eq 4) equal this point, Y .

12.5 Flexural Offset Yield Strength—Offset yield strength is the stress at which the stress-strain curve deviates by a given strain (offset) from the tangent to the initial straight line portion of the stress-strain curve. The value of the offset must be given whenever this property is calculated.

NOTE 14—This value may differ from flexural strength defined in 12.4. Both methods of calculation are described in the annex to Test Method D638.

12.6 Flexural Stress at Break (σ_{fB})—Flexural stress at break of the test specimen during a bending test. It is calculated according to Eq 3 or Eq 4. Some materials may give a load deflection curve that shows a break point, B , without a yield point (Fig. 1, Curve a) in which case $\sigma_{fB} = \sigma_{fM}$. Other materials may give a yield deflection curve with both a yield and a break point, B (Fig. 1, Curve b). The flexural stress at break may be calculated for these materials by letting P (in Eq 3 or Eq 4) equal this point, B .

12.7 Stress at a Given Strain—The stress in the outer surface of a test specimen at a given strain may be calculated in accordance with Eq 3 or Eq 4 by letting P equal the load read



NOTE—Curve a: Specimen that breaks before yielding.
Curve b: Specimen that yields and then breaks before the 5 % strain limit.
Curve c: Specimen that neither yields nor breaks before the 5 % strain limit.

FIG. 1 Typical Curves of Flexural Stress (σ_f) Versus Flexural Strain (ϵ_f)

from the load-deflection curve at the deflection corresponding to the desired strain (for highly orthotropic laminates, see Note 11).

12.8 Flexural Strain, ϵ_f —Nominal fractional change in the length of an element of the outer surface of the test specimen at midspan, where the maximum strain occurs. It may be calculated for any deflection using Eq 5:

$$\epsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (5)$$

where:

ϵ_f = strain in the outer surface, mm/mm (in./in.),

D = maximum deflection of the center of the beam, mm (in.),

L = support span, mm (in.), and

d = depth, mm (in.).

12.9 Modulus of Elasticity:

12.9.1 Tangent Modulus of Elasticity—The tangent modulus of elasticity, often called the “modulus of elasticity,” is the ratio, within the elastic limit, of stress to corresponding strain. It is calculated by drawing a tangent to the steepest initial straight-line portion of the load-deflection curve and using Eq 6 (for highly anisotropic composites, see Note 15).

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \quad (6)$$

where:

E_B = modulus of elasticity in bending, MPa (psi),

L = support span, mm (in.),

⁴ For a discussion of these effects, see Zweben, C., Smith, W. S., and Wardle, M. W., “Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus and Properties of Fabric-Reinforced Laminates,” *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, ASTM STP 674, 1979, pp. 228–262.

- b = width of beam tested, mm (in.),
 d = depth of beam tested, mm (in.), and
 m = slope of the tangent to the initial straight-line portion of the load-deflection curve, N/mm (lbf/in.) of deflection.

NOTE 15—Shear deflections can seriously reduce the apparent modulus of highly anisotropic composites when they are tested at low span-to-depth ratios.⁴ For this reason, a span-to-depth ratio of 60 to 1 is recommended for flexural modulus determinations on these composites. Flexural strength should be determined on a separate set of replicate specimens at a lower span-to-depth ratio that induces tensile failure in the outer fibers of the beam along its lower face. Since the flexural modulus of highly anisotropic laminates is a critical function of ply-stacking sequence, it will not necessarily correlate with tensile modulus, which is not stacking-sequence dependent.

12.9.2 Secant Modulus—The secant modulus is the ratio of stress to corresponding strain at any selected point on the stress-strain curve, that is, the slope of the straight line that joins the origin and a selected point on the actual stress-strain curve. It shall be expressed in megapascals (pounds per square inch). The selected point is chosen at a prespecified stress or strain in accordance with the appropriate material specification or by customer contract. It is calculated in accordance with Eq 6 by letting m equal the slope of the secant to the load-deflection curve. The chosen stress or strain point used for the determination of the secant shall be reported.

12.9.3 Chord Modulus (E_f)—The chord modulus may be calculated from two discrete points on the load deflection curve. The selected points are to be chosen at two prespecified stress or strain points in accordance with the appropriate material specification or by customer contract. The chosen stress or strain points used for the determination of the chord modulus shall be reported. Calculate the chord modulus, E_f using the following equation:

$$E_f = (\sigma_{f2} - \sigma_{f1}) / (\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}) \quad (7)$$

where:

σ_{f2} and σ_{f1} are the flexural stresses, calculated from Eq 3 or Eq 4 and measured at the predefined points on the load deflection curve, and ε_{f2} and

ε_{f1} are the flexural strain values, calculated from Eq 5 and measured at the predetermined points on the load deflection curve.

TABLE 2 Flexural Modulus

Material	Mean, 10 ³ psi	Values Expressed in units of % of 10 ³ psi			
		V_r^A	V_R^B	r^C	R^D
ABS	338	4.79	7.69	13.6	21.8
DAP thermoset	485	2.89	7.18	8.15	20.4
Cast acrylic	810	13.7	16.1	38.8	45.4
GR polyester	816	3.49	4.20	9.91	11.9
GR polycarbonate	1790	5.52	5.52	15.6	15.6
SMC	1950	10.9	13.8	30.8	39.1

^A V_r = within-laboratory coefficient of variation for the indicated material. It is obtained by first pooling the within-laboratory standard deviations of the test results from all of the participating laboratories: $S_r = [((s_1)^2 + (s_2)^2 \dots + (s_n)^2)/n]^{1/2}$ then $V_r = (S_r \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$.

^B V_R = between-laboratory reproducibility, expressed as the coefficient of variation: $S_R = (S_r^2 + S_L^2)^{1/2}$ where S_L is the standard deviation of laboratory means. Then: $V_R = (S_R \text{ divided by the overall average for the material}) \times 100$.

^C r = within-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times V_r$.

^D R = between-laboratory critical interval between two test results = $2.8 \times V_R$.

12.10 Arithmetic Mean—For each series of tests, the arithmetic mean of all values obtained shall be calculated to three significant figures and reported as the “average value” for the particular property in question.

12.11 Standard Deviation—The standard deviation (estimated) shall be calculated as follows and be reported to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2) / (n - 1)} \quad (8)$$

where:

s = estimated standard deviation,

X = value of single observation,

n = number of observations, and

\bar{X} = arithmetic mean of the set of observations.

13. Report

13.1 Report the following information:

13.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer’s code number, form, principal dimensions, and previous history (for laminated materials, ply-stacking sequence shall be reported),

13.1.2 Direction of cutting and loading specimens, when appropriate,

13.1.3 Conditioning procedure,

13.1.4 Depth and width of specimen,

13.1.5 Procedure used (A or B),

13.1.6 Support span length,

13.1.7 Support span-to-depth ratio if different than 16:1,

13.1.8 Radius of supports and loading noses, if different than 5 mm. When support and/or loading nose radii other than 5 mm are used, the results shall be identified as being generated by a modified version of this test method and the referring specification referenced as to the geometry used.

13.1.9 Rate of crosshead motion,

13.1.10 Flexural strain at any given stress, average value and standard deviation,

13.1.11 If a specimen is rejected, reason(s) for rejection,

13.1.12 Tangent, secant, or chord modulus in bending, average value, standard deviation, and the strain level(s) used if secant or chord modulus,

13.1.13 Flexural strength (if desired), average value, and standard deviation,

13.1.14 Stress at any given strain up to and including 5 % (if desired), with strain used, average value, and standard deviation,

13.1.15 Flexural stress at break (if desired), average value, and standard deviation,

13.1.16 Type of behavior, whether yielding or rupture, or both, or other observations, occurring within the 5 % strain limit, and

13.1.17 Date of specific version of test used.

14. Precision and Bias

14.1 Tables 1 and 2 are based on a round-robin test conducted in 1984, in accordance with Practice E691, involving six materials tested by six laboratories using Procedure A. For each material, all the specimens were prepared at one

source. Each “test result” was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

NOTE 16—**Caution:** The following explanations of r and R (14.2-14.2.3) are intended only to present a meaningful way of considering the approximate precision of these test methods. The data given in Tables 2 and 3 should not be applied rigorously to the acceptance or rejection of materials, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of these test methods should apply the principles outlined in Practice E691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 14.2-14.2.3 would then be valid for such data.

14.2 *Concept of “ r ” and “ R ” in Tables 1 and 2*—If S_r and S_R have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing five specimens for each test result, then:

14.2.1 *Repeatability*— Two test results obtained within one laboratory shall be judged not equivalent if they differ by more

than the r value for that material. r is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day in the same laboratory.

14.2.2 *Reproducibility*— Two test results obtained by different laboratories shall be judged not equivalent if they differ by more than the R value for that material. R is the interval representing the critical difference between two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment in different laboratories.

14.2.3 The judgments in 14.2.1 and 14.2.2 will have an approximately 95 % (0.95) probability of being correct.

14.3 *Bias*—No statement may be made about the bias of these test methods, as there is no standard reference material or reference test method that is applicable.

15. Keywords

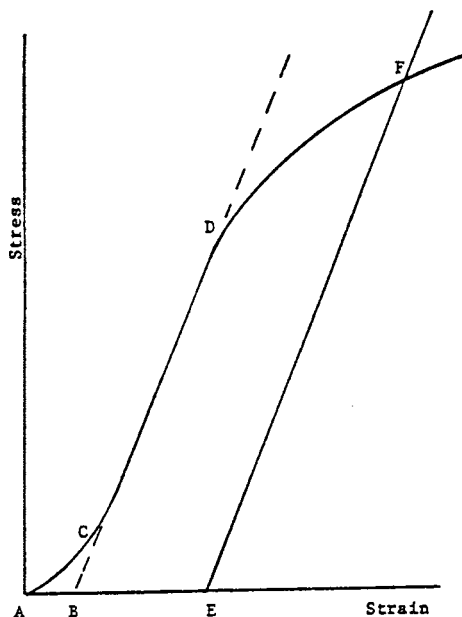
15.1 flexural properties; plastics; stiffness; strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (see Fig. A1.1) there is a toe region, AC, that does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a takeup of slack and



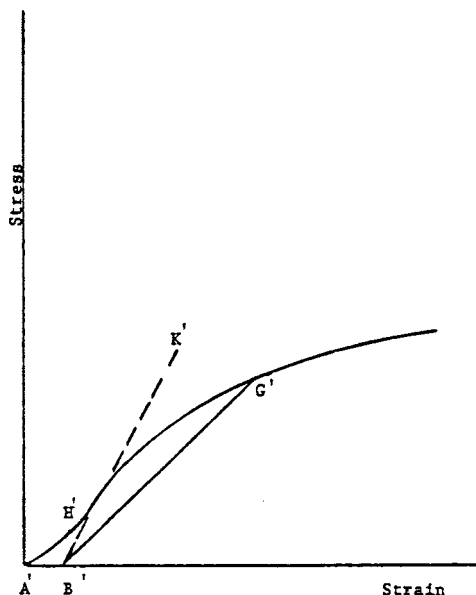
NOTE—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.1 Material with Hookean Region

alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (see Fig. A1.1), a continuation of the linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (BE), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the Line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point B, defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (see Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection Point H' . This is extended to intersect the strain axis at Point B' , the corrected zero-strain point. Using Point B' as zero strain, the stress at any point (G') on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of Line $B'G'$). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.



NOTE—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

A2. MEASURING AND SETTING SPAN

A2.1 For flexural fixtures that have adjustable spans, it is important that the span between the supports is maintained constant or the actual measured span is used in the calculation of stress, modulus, and strain, and the loading nose or noses are positioned and aligned properly with respect to the supports. Some simple steps as follows can improve the repeatability of your results when using these adjustable span fixtures.

A2.2 Measurement of Span:

A2.2.1 This technique is needed to ensure that the correct span, not an estimated span, is used in the calculation of results.

A2.2.2 Scribe a permanent line or mark at the exact center of the support where the specimen makes complete contact. The type of mark depends on whether the supports are fixed or rotatable (see Figs. A2.1 and A2.2).

A2.2.3 Using a vernier caliper with pointed tips that is readable to at least 0.1 mm (0.004 in.), measure the distance between the supports, and use this measurement of span in the calculations.

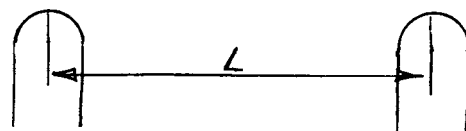


FIG. A2.1 Markings on Fixed Specimen Supports

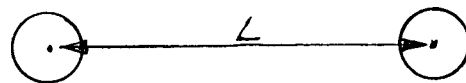


FIG. A2.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

A2.3 *Setting the Span and Alignment of Loading Nose(s)*—To ensure a consistent day-to-day setup of the span and ensure the alignment and proper positioning of the loading nose, simple jigs should be manufactured for each of the standard setups used. An example of a jig found to be useful is shown in Fig. A2.3.

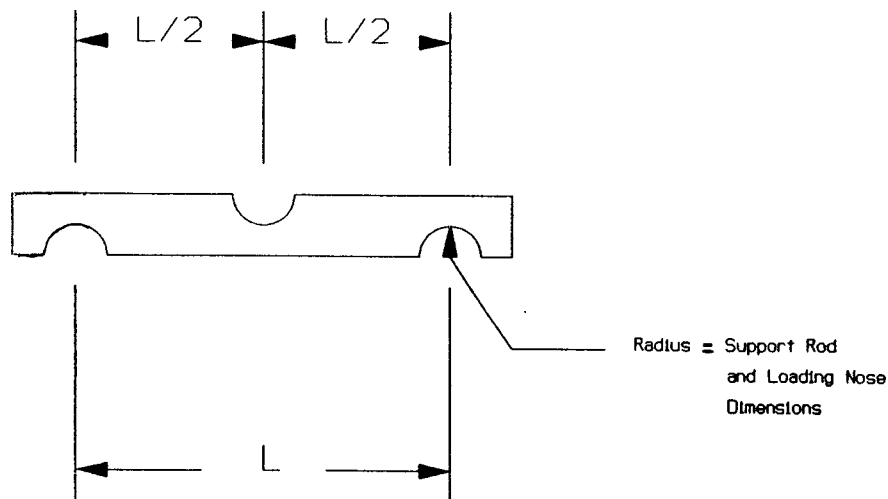


FIG. A2.3 Fixture Used to Set Loading Nose and Support Spacing and Alignment

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. DEVELOPMENT OF A FLEXURAL MACHINE COMPLIANCE CORRECTION

X1.1 Introduction

X1.1.1 Universal Testing instrument drive systems always exhibit a certain level of compliance that is characterized by a variance between the reported crosshead displacement and the displacement actually imparted to the specimen. This variance is a function of load frame stiffness, drive system wind-up, load cell compliance and fixture compliance. To accurately measure the flexural modulus of a material, this compliance should be measured and empirically subtracted from test data. Flexural modulus results without the corrections are lower than if the correction is applied. The greater the stiffness of the material the more influence the system compliance has on results.

X1.1.2 It is not necessary to make the machine compliance correction when a deflectometer/extensometer is used to measure the actual deflection occurring in the specimen as it is deflected.

X1.2 Terminology

X1.2.1 *Compliance*—The displacement difference between test machine drive system displacement values and actual specimen displacement

X1.2.2 *Compliance Correction*—An analytical method of modifying test instrument displacement values to eliminate the amount of that measurement attributed to test instrument compliance.

X1.3 Apparatus

- X1.3.1 Universal Testing machine
- X1.3.2 Load cell
- X1.3.3 Flexure fixture including loading nose and specimen supports
- X1.3.4 Computer Software to make corrections to the displacements

X1.3.5 Steel bar, with smoothed surfaces and a calculated flexural stiffness of more than 100 times greater than the test material. The length should be at least 13 mm greater than the support span. The width shall match the width of the test specimen and the thickness shall be that required to achieve or exceed the target stiffness.

X1.4 Safety Precautions

X1.4.1 The universal testing machine should stop the machine crosshead movement when the load reaches 90 % of load cell capacity, to prevent damage to the load cell.

X1.4.2 The compliance curve determination should be made at a speed no higher than 2 mm/min. Because the load builds up rapidly since the steel bar does not deflect, it is quite easy to exceed the load cell capacity.

X1.5 Procedure

NOTE X1.1—A new compliance correction curve should be established each time there is a change made to the setup of the test machine, such as, load cell changed or reinstallation of the flexure fixture on the machine. If the test machine is dedicated to flexural testing, and there are no changes to the setup, it is not necessary to re-calculate the compliance curve.

NOTE X1.2—On those machines with computer software that automatically make this compliance correction; refer to the software manual to determine how this correction should be made.

X1.5.1 The procedure to determine compliance follows:

X1.5.1.1 Configure the test system to match the actual test configuration.

X1.5.1.2 Place the steel bar in the test fixture, duplicating the position of a specimen during actual testing.

X1.5.1.3 Set the crosshead speed to 2 mm/min. or less and start the crosshead moving in the test direction recording crosshead displacement and the corresponding load values.

X1.5.1.4 Increase load to a point exceeding the highest load expected during specimen testing. Stop the crosshead and return to the pre-test location.

X1.5.1.5 The recorded load-deflection curve, starting when the loading nose contacts the steel bar to the time that the highest load expected is defined as test system compliance.

X1.5.2 Procedure to apply compliance correction is as follows:

X1.5.2.1 Run the flexural test method on the material at the crosshead required for the measurement.

X1.5.2.2 It is preferable that computer software be used to make the displacement corrections, but if it is not available compliance corrections can be made manually in the following manner. Determine the range of displacement (D) on the load versus displacement curve for the material, over which the modulus is to be calculated. For Young's Modulus that would steepest region of the curve below the proportional limit. For Secant and Chord Moduli that would be at specified level of strain or specified levels of strain, respectively. Draw two vertical lines up from the displacement axis for the two chosen displacements (D1, D2) to the load versus displacement curve for the material. In some cases one of these points maybe at zero displacement after the toe compensation correction is made. Draw two horizontal lines from these points on the load displacement curve to the Load (P) axis. Determine the loads (L1, L2).

X1.5.2.3 Using the Compliance Correction load displacement curve for the steel bar, mark off L1 and L2 on the Load (P) axis. From these two points draw horizontal lines across till they contact the load versus displacement curve for the steel

bar. From these two points on the load deflection curve draw two vertical lines downwards to the displacement axis. These two points on the displacement axis determine the corrections (c1, c2) that need to be made to the displacements measurements for the test material.

X1.5.2.4 Subtract the corrections (c1, c2) from the measured displacements (D1, D2), so that a true measures of test specimen deflection (D1-c1, D2-c2) are obtained.

X1.6 Calculations

X1.6.1 Calculation of Chord Modulus

X1.6.1.1 Calculate the stresses ($\sigma f1$, $\sigma f2$) for load points L1 and L2 from Fig. X1.1 using the equation in 12.2 3.

X1.6.1.2 Calculate the strains ($\epsilon f1$, $\epsilon f2$) for displacements D1-c1 and D2-c2 from Fig. X1.3 using the equation in 12.8 Eq. 5.

X1.6.1.3 Calculate the flexural chord modulus in accordance with 12.9.3 Eq. 7.

X1.6.2 Calculation of Secant Modulus

X1.6.2.1 Calculation of the Secant Modulus at any strain along the curve would be the same as conducting a chord modulus measurement, except that $\sigma f1 = 0$, $L1 = 0$, and $D1-c1 = 0$.

X1.6.3 Calculation of Young's Modulus

X1.6.3.1 Determine the steepest slope "m" along the curve, below the proportional limit, using the selected loads L1 and L2 from Fig. X1.1 and the displacements D1-c1 and D2-c2 from Fig. X1.3.

X1.6.3.2 Calculate the Young's modulus in accordance with 12.9.1 Eq. 6.

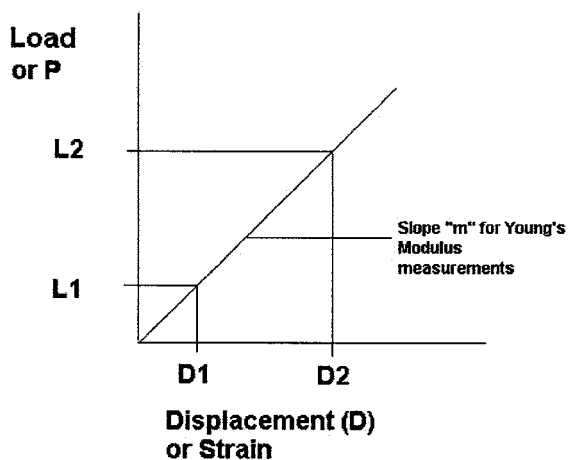


FIG. X1.1 Example of Modulus Curve for a Material

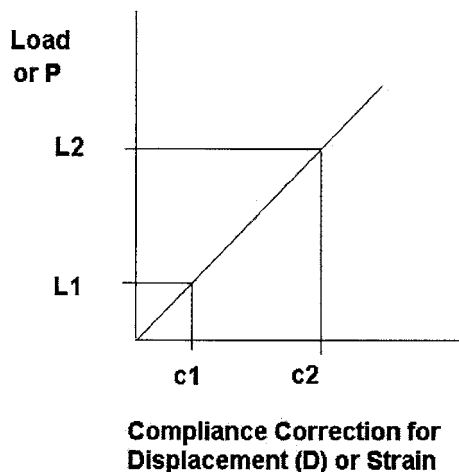


FIG. X1.2 Compliance Curve for Steel Bar

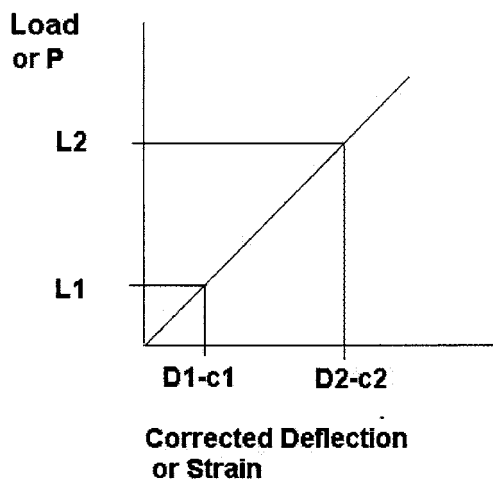


FIG. X1.3 Example of the Material Curve Corrected for the Compliance Corrected Displacement or Strain

SUMMARY OF CHANGES

Committee D20 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (D790 - 07^{e1}) that may impact the use of this standard. (April 1, 2010)

(I) Revised Section 9.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).



Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹

This standard is issued under the fixed designation D 638; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope *

1.1 This test method covers the determination of the tensile properties of unreinforced and reinforced plastics in the form of standard dumbbell-shaped test specimens when tested under defined conditions of pretreatment, temperature, humidity, and testing machine speed.

1.2 This test method can be used for testing materials of any thickness up to 14 mm (0.55 in.). However, for testing specimens in the form of thin sheeting, including film less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness, Test Methods D 882 is the preferred test method. Materials with a thickness greater than 14 mm (0.55 in.) must be reduced by machining.

1.3 This test method includes the option of determining Poisson's ratio at room temperature.

NOTE 1—This test method and ISO 527-1 are technically equivalent.

NOTE 2—This test method is not intended to cover precise physical procedures. It is recognized that the constant rate of crosshead movement type of test leaves much to be desired from a theoretical standpoint, that wide differences may exist between rate of crosshead movement and rate of strain between gage marks on the specimen, and that the testing speeds specified disguise important effects characteristic of materials in the plastic state. Further, it is realized that variations in the thicknesses of test specimens, which are permitted by these procedures, produce variations in the surface-volume ratios of such specimens, and that these variations may influence the test results. Hence, where directly comparable results are desired, all samples should be of equal thickness. Special additional tests should be used where more precise physical data are needed.

NOTE 3—This test method may be used for testing phenolic molded resin or laminated materials. However, where these materials are used as electrical insulation, such materials should be tested in accordance with Test Methods D 229 and Test Method D 651.

NOTE 4—For tensile properties of resin-matrix composites reinforced with oriented continuous or discontinuous high modulus >20 -GPa ($>3.0 \times 10^6$ -psi) fibers, tests shall be made in accordance with Test Method D 3039/D 3039M.

1.4 Test data obtained by this test method are relevant and appropriate for use in engineering design.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties.

Current edition approved November 10, 2002. Published January 2003. Originally approved in 1941. Last previous edition approved in 2002 as D 638 – 02.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 229 Test Methods for Rigid Sheet and Plate Materials Used for Electrical Insulation²
- D 412 Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension³
- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing⁴
- D 651 Test Method for Tensile Strength of Molded Electrical Insulating Materials⁵
- D 882 Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheet⁴
- D 883 Terminology Relating to Plastics⁴
- D 1822 Test Method for Tensile-Impact Energy to Break Plastics and Electrical Insulating Materials⁴
- D 3039/D 3039M Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials⁶
- D 4000 Classification System for Specifying Plastic Materials⁷
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials⁷
- D 5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastic Specimens⁸
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁹
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometer⁹
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature⁹
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 09.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

⁵ Discontinued; see 1994 Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁸ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.03.

⁹ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.



- Determine the Precision of a Test Method¹⁰
 2.2 *ISO Standard:*
 ISO 527-1 Determination of Tensile Properties¹¹

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Definitions of terms applying to this test method appear in Terminology D 883 and Annex A2.

4. Significance and Use

4.1 This test method is designed to produce tensile property data for the control and specification of plastic materials. These data are also useful for qualitative characterization and for research and development. For many materials, there may be a specification that requires the use of this test method, but with some procedural modifications that take precedence when adhering to the specification. Therefore, it is advisable to refer to that material specification before using this test method. Table 1 in Classification D 4000 lists the ASTM materials standards that currently exist.

4.2 Tensile properties may vary with specimen preparation and with speed and environment of testing. Consequently, where precise comparative results are desired, these factors must be carefully controlled.

4.2.1 It is realized that a material cannot be tested without also testing the method of preparation of that material. Hence, when comparative tests of materials per se are desired, the greatest care must be exercised to ensure that all samples are prepared in exactly the same way, unless the test is to include the effects of sample preparation. Similarly, for referee purposes or comparisons within any given series of specimens, care must be taken to secure the maximum degree of uniformity in details of preparation, treatment, and handling.

4.3 Tensile properties may provide useful data for plastics engineering design purposes. However, because of the high degree of sensitivity exhibited by many plastics to rate of straining and environmental conditions, data obtained by this test method cannot be considered valid for applications involving load-time scales or environments widely different from those of this test method. In cases of such dissimilarity, no reliable estimation of the limit of usefulness can be made for most plastics. This sensitivity to rate of straining and environment necessitates testing over a broad load-time scale (including impact and creep) and range of environmental conditions if tensile properties are to suffice for engineering design purposes.

NOTE 5—Since the existence of a true elastic limit in plastics (as in many other organic materials and in many metals) is debatable, the propriety of applying the term “elastic modulus” in its quoted, generally accepted definition to describe the “stiffness” or “rigidity” of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are highly dependent on such factors as rate of application of stress, temperature, previous history of specimen, etc. However, stress-strain curves for plastics, determined as described in this test method, almost always show a linear region at low stresses, and a straight line drawn tangent to this portion of the curve permits calculation of an elastic

modulus of the usually defined type. Such a constant is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and similar factors are realized.

4.4 *Poisson's Ratio*—When uniaxial tensile force is applied to a solid, the solid stretches in the direction of the applied force (axially), but it also contracts in both dimensions lateral to the applied force. If the solid is homogeneous and isotropic, and the material remains elastic under the action of the applied force, the lateral strain bears a constant relationship to the axial strain. This constant, called Poisson's ratio, is defined as the negative ratio of the transverse (negative) to axial strain under uniaxial stress.

4.4.1 Poisson's ratio is used for the design of structures in which all dimensional changes resulting from the application of force need to be taken into account and in the application of the generalized theory of elasticity to structural analysis.

NOTE 6—The accuracy of the determination of Poisson's ratio is usually limited by the accuracy of the transverse strain measurements because the percentage errors in these measurements are usually greater than in the axial strain measurements. Since a ratio rather than an absolute quantity is measured, it is only necessary to know accurately the relative value of the calibration factors of the extensometers. Also, in general, the value of the applied loads need not be known accurately.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—A testing machine of the constant-rate-of-crosshead-movement type and comprising essentially the following:

5.1.1 *Fixed Member*—A fixed or essentially stationary member carrying one grip.

5.1.2 *Movable Member*—A movable member carrying a second grip.

5.1.3 *Grips*—Grips for holding the test specimen between the fixed member and the movable member of the testing machine can be either the fixed or self-aligning type.

5.1.3.1 Fixed grips are rigidly attached to the fixed and movable members of the testing machine. When this type of grip is used extreme care should be taken to ensure that the test specimen is inserted and clamped so that the long axis of the test specimen coincides with the direction of pull through the center line of the grip assembly.

5.1.3.2 Self-aligning grips are attached to the fixed and movable members of the testing machine in such a manner that they will move freely into alignment as soon as any load is applied so that the long axis of the test specimen will coincide with the direction of the applied pull through the center line of the grip assembly. The specimens should be aligned as perfectly as possible with the direction of pull so that no rotary motion that may induce slippage will occur in the grips; there is a limit to the amount of misalignment self-aligning grips will accommodate.

5.1.3.3 The test specimen shall be held in such a way that slippage relative to the grips is prevented insofar as possible. Grip surfaces that are deeply scored or serrated with a pattern similar to those of a coarse single-cut file, serrations about 2.4 mm (0.09 in.) apart and about 1.6 mm (0.06 in.) deep, have been found satisfactory for most thermoplastics. Finer serrations have been found to be more satisfactory for harder plastics, such as the thermosetting materials. The serrations

¹⁰ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

¹¹ Available from American National Standards Institute, 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

should be kept clean and sharp. Breaking in the grips may occur at times, even when deep serrations or abraded specimen surfaces are used; other techniques must be used in these cases. Other techniques that have been found useful, particularly with smooth-faced grips, are abrading that portion of the surface of the specimen that will be in the grips, and interposing thin pieces of abrasive cloth, abrasive paper, or plastic, or rubber-coated fabric, commonly called hospital sheeting, between the specimen and the grip surface. No. 80 double-sided abrasive paper has been found effective in many cases. An open-mesh fabric, in which the threads are coated with abrasive, has also been effective. Reducing the cross-sectional area of the specimen may also be effective. The use of special types of grips is sometimes necessary to eliminate slippage and breakage in the grips.

5.1.4 Drive Mechanism—A drive mechanism for imparting to the movable member a uniform, controlled velocity with respect to the stationary member, with this velocity to be regulated as specified in Section 8.

5.1.5 Load Indicator—A suitable load-indicating mechanism capable of showing the total tensile load carried by the test specimen when held by the grips. This mechanism shall be essentially free of inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy of $\pm 1\%$ of the indicated value, or better. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E 4.

NOTE 7—Experience has shown that many testing machines now in use are incapable of maintaining accuracy for as long as the periods between inspection recommended in Practices E 4. Hence, it is recommended that each machine be studied individually and verified as often as may be found necessary. It frequently will be necessary to perform this function daily.

5.1.6 The fixed member, movable member, drive mechanism, and grips shall be constructed of such materials and in such proportions that the total elastic longitudinal strain of the system constituted by these parts does not exceed 1 % of the total longitudinal strain between the two gage marks on the test specimen at any time during the test and at any load up to the rated capacity of the machine.

5.1.7 Crosshead Extension Indicator—A suitable extension indicating mechanism capable of showing the amount of change in the separation of the grips, that is, crosshead movement. This mechanism shall be essentially free of inertial lag at the specified rate of testing and shall indicate the crosshead movement with an accuracy of $\pm 10\%$ of the indicated value.

5.2 Extension Indicator (extensometer)—A suitable instrument shall be used for determining the distance between two designated points within the gage length of the test specimen as the specimen is stretched. For referee purposes, the extensometer must be set at the full gage length of the specimen, as shown in Fig. 1. It is desirable, but not essential, that this instrument automatically record this distance, or any change in it, as a function of the load on the test specimen or of the elapsed time from the start of the test, or both. If only the latter is obtained, load-time data must also be taken. This instrument shall be essentially free of inertia at the specified speed of

testing. Extensometers shall be classified and their calibration periodically verified in accordance with Practice E 83.

5.2.1 Modulus-of-Elasticity Measurements—For modulus-of-elasticity measurements, an extensometer with a maximum strain error of 0.0002 mm/mm (in./in.) that automatically and continuously records shall be used. An extensometer classified by Practice E 83 as fulfilling the requirements of a B-2 classification within the range of use for modulus measurements meets this requirement.

5.2.2 Low-Extension Measurements—For elongation-at-yield and low-extension measurements (nominally 20 % or less), the same above extensometer, attenuated to 20 % extension, may be used. In any case, the extensometer system must meet at least Class C (Practice E 83) requirements, which include a fixed strain error of 0.001 strain or $\pm 1.0\%$ of the indicated strain, whichever is greater.

5.2.3 High-Extension Measurements—For making measurements at elongations greater than 20 %, measuring techniques with error no greater than $\pm 10\%$ of the measured value are acceptable.

5.2.4 Poisson's Ratio—Bi-axial extensometer or axial and transverse extensometers capable of recording axial strain and transverse strain simultaneously. The extensometers shall be capable of measuring the change in strains with an accuracy of 1 % of the relevant value or better.

NOTE 8—Strain gages can be used as an alternative method to measure axial and transverse strain; however, proper techniques for mounting strain gages are crucial to obtaining accurate data. Consult strain gage suppliers for instruction and training in these special techniques.

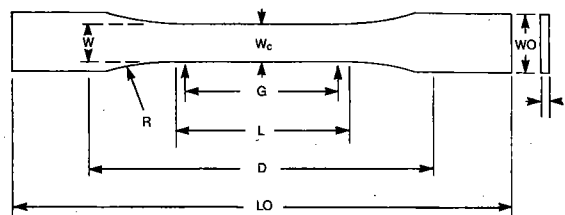
5.3 Micrometers—Suitable micrometers for measuring the width and thickness of the test specimen to an incremental discrimination of at least 0.025 mm (0.001 in.) should be used. All width and thickness measurements of rigid and semirigid plastics may be measured with a hand micrometer with ratchet. A suitable instrument for measuring the thickness of nonrigid test specimens shall have: (1) a contact measuring pressure of 25 ± 2.5 kPa (3.6 ± 0.36 psi), (2) a movable circular contact foot 6.35 ± 0.025 mm (0.250 ± 0.001 in.) in diameter, and (3) a lower fixed anvil large enough to extend beyond the contact foot in all directions and being parallel to the contact foot within 0.005 mm (0.0002 in.) over the entire foot area. Flatness of the foot and anvil shall conform to Test Method D 5947.

5.3.1 An optional instrument equipped with a circular contact foot 15.88 ± 0.08 mm (0.625 ± 0.003 in.) in diameter is recommended for thickness measuring of process samples or larger specimens at least 15.88 mm in minimum width.

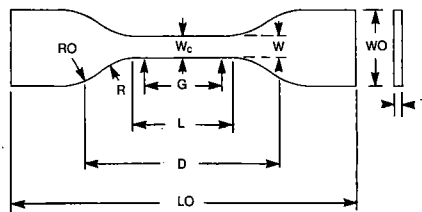
6. Test Specimens

6.1 Sheet, Plate, and Molded Plastics:

6.1.1 Rigid and Semirigid Plastics—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type I specimen is the preferred specimen and shall be used where sufficient material having a thickness of 7 mm (0.28 in.) or less is available. The Type II specimen may be used when a material does not break in the narrow section with the preferred Type I specimen. The Type V specimen shall be used where only limited material having a thickness of 4 mm (0.16 in.) or less is available for evaluation, or where a large number of



TYPES I, II, III & V



TYPE IV

Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^A

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}		
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}	
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C	
WO—Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)	
WO—Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)	
G—Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C	
G—Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)	
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C	
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

^A Thickness, T , shall be 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 0.02 in.) for all types of molded specimens, and for other Types I and II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, T , may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55 in.) the specimens shall be machined to 14 ± 0.4 mm (0.55 ± 0.02 in.) in thickness, for use with the Type III specimen. For sheets of nominal thickness between 14 and 51 mm (0.55 and 2 in.) approximately equal amounts shall be machined from each surface. For thicker sheets both surfaces of the specimen shall be machined, and the location of the specimen with reference to the original thickness of the sheet shall be noted. Tolerances on thickness less than 14 mm (0.55 in.) shall be those standard for the grade of material tested.

^B For the Type IV specimen, the internal width of the narrow section of the die shall be 6.00 ± 0.05 mm (0.250 ± 0.002 in.). The dimensions are essentially those of Die C in Test Methods D 412.

^C The Type V specimen shall be machined or die cut to the dimensions shown, or molded in a mold whose cavity has these dimensions. The dimensions shall be:

$W = 3.18 \pm 0.03$ mm (0.125 ± 0.001 in.),

$L = 9.53 \pm 0.08$ mm (0.375 ± 0.003 in.),

$G = 7.62 \pm 0.02$ mm (0.300 ± 0.001 in.), and

$R = 12.7 \pm 0.08$ mm (0.500 ± 0.003 in.).

The other tolerances are those in the table.

^D Supporting data on the introduction of the L specimen of Test Method D 1822 as the Type V specimen are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1038.

^E The width at the center W_c shall be $+0.00$ mm, -0.10 mm ($+0.000$ in., -0.004 in.) compared with width W at other parts of the reduced section. Any reduction in W at the center shall be gradual, equally on each side so that no abrupt changes in dimension result.

^F For molded specimens, a draft of not over 0.13 mm (0.005 in.) may be allowed for either Type I or II specimens 3.2 mm (0.13 in.) in thickness, and this should be taken into account when calculating width of the specimen. Thus a typical section of a molded Type I specimen, having the maximum allowable draft, could be as follows:

^G Overall widths greater than the minimum indicated may be desirable for some materials in order to avoid breaking in the grips.

^H Overall lengths greater than the minimum indicated may be desirable either to avoid breaking in the grips or to satisfy special test requirements.

^I Test marks or initial extensometer span.

^J When self-tightening grips are used, for highly extensible polymers, the distance between grips will depend upon the types of grips used and may not be critical if maintained uniform once chosen.

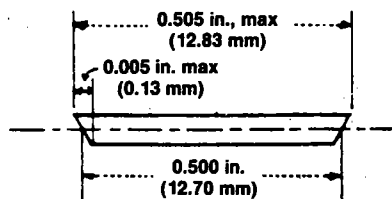


FIG. 1 Tension Test Specimens for Sheet, Plate, and Molded Plastics

specimens are to be exposed in a limited space (thermal and environmental stability tests, etc.). The Type IV specimen

should be used when direct comparisons are required between materials in different rigidity cases (that is, nonrigid and

semirigid). The Type III specimen must be used for all materials with a thickness of greater than 7 mm (0.28 in.) but not more than 14 mm (0.55 in.).

6.1.2 *Nonrigid Plastics*—The test specimen shall conform to the dimensions shown in Fig. 1. The Type IV specimen shall be used for testing nonrigid plastics with a thickness of 4 mm (0.16 in.) or less. The Type III specimen must be used for all materials with a thickness greater than 7 mm (0.28 in.) but not more than 14 mm (0.55 in.).

6.1.3 *Reinforced Composites*—The test specimen for reinforced composites, including highly orthotropic laminates, shall conform to the dimensions of the Type I specimen shown in Fig. 1.

6.1.4 *Preparation*—Test specimens shall be prepared by machining operations, or die cutting, from materials in sheet, plate, slab, or similar form. Materials thicker than 14 mm (0.55 in.) must be machined to 14 mm (0.55 in.) for use as Type III specimens. Specimens can also be prepared by molding the material to be tested.

NOTE 9—Test results have shown that for some materials such as glass cloth, SMC, and BMC laminates, other specimen types should be considered to ensure breakage within the gage length of the specimen, as mandated by 7.3.

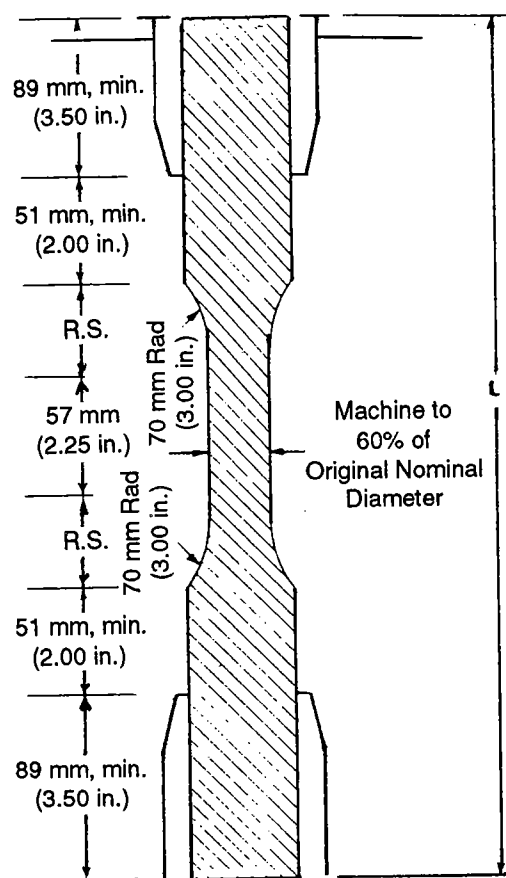
NOTE 10—When preparing specimens from certain composite laminates such as woven roving, or glass cloth, care must be exercised in cutting the specimens parallel to the reinforcement. The reinforcement will be significantly weakened by cutting on a bias, resulting in lower laminate properties, unless testing of specimens in a direction other than parallel with the reinforcement constitutes a variable being studied.

NOTE 11—Specimens prepared by injection molding may have different tensile properties than specimens prepared by machining or die-cutting because of the orientation induced. This effect may be more pronounced in specimens with narrow sections.

6.2 *Rigid Tubes*—The test specimen for rigid tubes shall be as shown in Fig. 2. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 2. A groove shall be machined around the outside of the specimen at the center of its length so that the wall section after machining shall be 60 % of the original nominal wall thickness. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter. Steel or brass plugs having diameters such that they will fit snugly inside the tube and having a length equal to the full jaw length plus 25 mm (1 in.) shall be placed in the ends of the specimens to prevent crushing. They can be located conveniently in the tube by separating and supporting them on a threaded metal rod. Details of plugs and test assembly are shown in Fig. 2.

6.3 *Rigid Rods*—The test specimen for rigid rods shall be as shown in Fig. 3. The length, L , shall be as shown in the table in Fig. 3. A groove shall be machined around the specimen at the center of its length so that the diameter of the machined portion shall be 60 % of the original nominal diameter. This groove shall consist of a straight section 57.2 mm (2.25 in.) in length with a radius of 76 mm (3 in.) at each end joining it to the outside diameter.

6.4 All surfaces of the specimen shall be free of visible flaws, scratches, or imperfections. Marks left by coarse machining operations shall be carefully removed with a fine file or abrasive, and the filed surfaces shall then be smoothed with abrasive paper (No. 00 or finer). The finishing sanding strokes



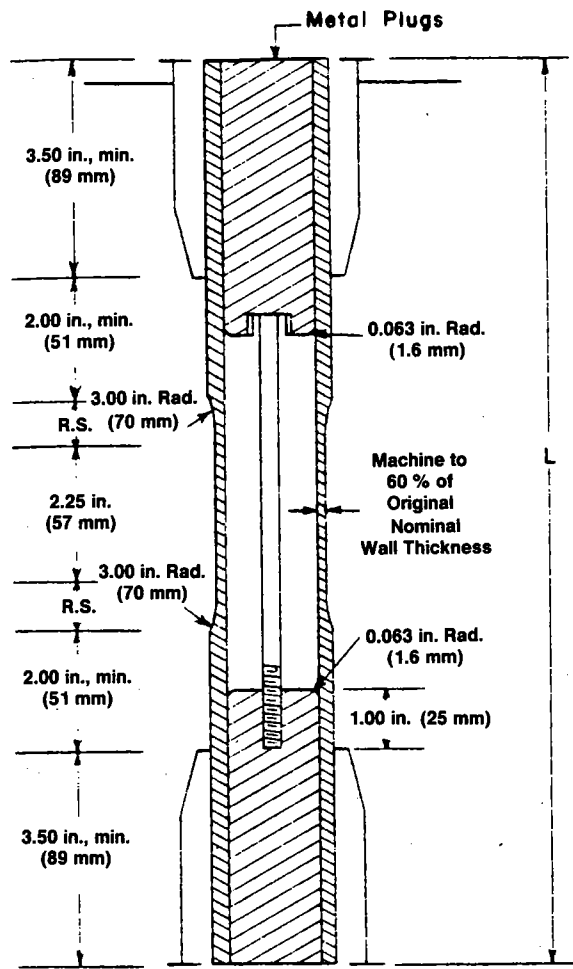
DIMENSIONS OF ROD SPECIMENS

Nominal Diameter	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L , of Specimen to Be Used for 89-mm (3½-in.) Jaws ^A
mm (in.)			
3.2 (1/8)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
4.7 (1/4)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
6.4 (1/4)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
9.5 (3/8)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
12.7 (1/2)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
15.9 (5/8)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
19.0 (3/4)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
22.2 (7/8)	51.5 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
25.4 (1)	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (16.5)
31.8 (1¼)	60.9 (2.398)	398 (15.65)	419 (16.5)
38.1 (1½)	66.4 (2.615)	403 (15.87)	419 (16.5)
42.5 (1¾)	71.4 (2.812)	408 (16.06)	419 (16.5)
50.8 (2)	76.0 (2.993)	412 (16.24)	432 (17)

^A For other jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 3 Diagram Showing Location of Rod Tension Test Specimen in Testing Machine

shall be made in a direction parallel to the long axis of the test specimen. All flash shall be removed from a molded specimen, taking great care not to disturb the molded surfaces. In machining a specimen, undercuts that would exceed the dimensional tolerances shown in Fig. 1 shall be scrupulously avoided. Care shall also be taken to avoid other common machining errors.



DIMENSIONS OF TUBE SPECIMENS

Nominal Wall Thickness	Length of Radial Sections, 2R.S.	Total Calculated Minimum Length of Specimen	Standard Length, L , of Specimen to Be Used for 89-mm (3.5-in.) Jaws ^A
mm (in.)			
0.79 (1/32)	13.9 (0.547)	350 (13.80)	381 (15)
1.2 (3/64)	17.0 (0.670)	354 (13.92)	381 (15)
1.6 (1/16)	19.6 (0.773)	356 (14.02)	381 (15)
2.4 (3/32)	24.0 (0.946)	361 (14.20)	381 (15)
3.2 (1/8)	27.7 (1.091)	364 (14.34)	381 (15)
4.8 (3/16)	33.9 (1.333)	370 (14.58)	381 (15)
6.4 (1/4)	39.0 (1.536)	376 (14.79)	400 (15.75)
7.9 (5/16)	43.5 (1.714)	380 (14.96)	400 (15.75)
9.5 (3/8)	47.6 (1.873)	384 (15.12)	400 (15.75)
11.1 (7/16)	51.3 (2.019)	388 (15.27)	400 (15.75)
12.7 (1/2)	54.7 (2.154)	391 (15.40)	419 (16.5)

^A For other jaws greater than 89 mm (3.5 in.), the standard length shall be increased by twice the length of the jaws minus 178 mm (7 in.). The standard length permits a slippage of approximately 6.4 to 12.7 mm (0.25 to 0.50 in.) in each jaw while maintaining the maximum length of the jaw grip.

FIG. 2 Diagram Showing Location of Tube Tension Test Specimens in Testing Machine

6.5 If it is necessary to place gage marks on the specimen, this shall be done with a wax crayon or India ink that will not affect the material being tested. Gage marks shall not be scratched, punched, or impressed on the specimen.

6.6 When testing materials that are suspected of anisotropy, duplicate sets of test specimens shall be prepared, having their long axes respectively parallel with, and normal to, the suspected direction of anisotropy.

7. Number of Test Specimens

7.1 Test at least five specimens for each sample in the case of isotropic materials.

7.2 Test ten specimens, five normal to, and five parallel with, the principle axis of anisotropy, for each sample in the case of anisotropic materials.

7.3 Discard specimens that break at some flaw, or that break outside of the narrow cross-sectional test section (Fig. 1, dimension "L"), and make retests, unless such flaws constitute a variable to be studied.

NOTE 12—Before testing, all transparent specimens should be inspected in a polariscope. Those which show atypical or concentrated strain patterns should be rejected, unless the effects of these residual strains constitute a variable to be studied.

8. Speed of Testing

8.1 Speed of testing shall be the relative rate of motion of the grips or test fixtures during the test. The rate of motion of the driven grip or fixture when the testing machine is running idle may be used, if it can be shown that the resulting speed of testing is within the limits of variation allowed.

8.2 Choose the speed of testing from Table 1. Determine this chosen speed of testing by the specification for the material being tested, or by agreement between those concerned. When the speed is not specified, use the lowest speed shown in Table 1 for the specimen geometry being used, which gives rupture within 1/2 to 5-min testing time.

8.3 Modulus determinations may be made at the speed selected for the other tensile properties when the recorder response and resolution are adequate.

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
Nonrigid	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
	III	50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

^A Select the lowest speed that produces rupture in 1/2 to 5 min for the specimen geometry being used (see 8.2).

^B See Terminology D 883 for definitions.

^C The initial rate of straining cannot be calculated exactly for dumbbell-shaped specimens because of extension, both in the reduced section outside the gage length and in the fillets. This initial strain rate can be measured from the initial slope of the tensile strain-versus-time diagram.

8.4 Poisson's ratio determinations shall be made at the same speed selected for modulus determinations.

9. Conditioning

9.1 *Conditioning*—Condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity for not less than 40 h prior to test in accordance with Procedure A of Practice D 618, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference pre-test conditioning, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F) and $\pm 2\%$ relative humidity.

9.2 *Test Conditions*—Conduct the tests at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and $50 \pm 5\%$ relative humidity, unless otherwise specified by contract or the relevant ASTM material specification. Reference testing conditions, to settle disagreements, shall apply tolerances of $\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F) and $\pm 2\%$ relative humidity.

10. Procedure

10.1 Measure the width and thickness of rigid flat specimens (Fig. 1) with a suitable micrometer to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) at several points along their narrow sections. Measure the thickness of nonrigid specimens (produced by a Type IV die) in the same manner with the required dial micrometer. Take the width of this specimen as the distance between the cutting edges of the die in the narrow section. Measure the diameter of rod specimens, and the inside and outside diameters of tube specimens, to the nearest 0.025 mm (0.001 in.) at a minimum of two points 90° apart; make these measurements along the groove for specimens so constructed. Use plugs in testing tube specimens, as shown in Fig. 2.

TABLE 2 Modulus, 10^6 psi, for Eight Laboratories, Five Materials

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Polypropylene	0.210	0.0089	0.071	0.025	0.201
Cellulose acetate butyrate	0.246	0.0179	0.035	0.051	0.144
Acrylic	0.481	0.0179	0.063	0.051	0.144
Glass-reinforced nylon	1.17	0.0537	0.217	0.152	0.614
Glass-reinforced polyester	1.39	0.0894	0.266	0.253	0.753

10.2 Place the specimen in the grips of the testing machine, taking care to align the long axis of the specimen and the grips with an imaginary line joining the points of attachment of the grips to the machine. The distance between the ends of the gripping surfaces, when using flat specimens, shall be as indicated in Fig. 1. On tube and rod specimens, the location for the grips shall be as shown in Fig. 2 and Fig. 3. Tighten the grips evenly and firmly to the degree necessary to prevent slippage of the specimen during the test, but not to the point where the specimen would be crushed.

10.3 Attach the extension indicator. When modulus is being determined, a Class B-2 or better extensometer is required (see 5.2.1).

NOTE 13—Modulus of materials is determined from the slope of the linear portion of the stress-strain curve. For most plastics, this linear portion is very small, occurs very rapidly, and must be recorded automatically. The change in jaw separation is never to be used for calculating modulus or elongation.

10.3.1 Poisson's Ratio Determination:

10.3.1.1 When Poisson's ratio is determined, the speed of testing and the load range at which it is determined shall be the same as those used for modulus of elasticity.

10.3.1.2 Attach the transverse strain measuring device. The transverse strain measuring device must continuously measure the strain simultaneously with the axial strain measuring device.

TABLE 3 Tensile Stress at Yield, 10^3 psi, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Polypropylene	3.63	0.022	0.161	0.062	0.456
Cellulose acetate butyrate	5.01	0.058	0.227	0.164	0.642
Acrylic	10.4	0.067	0.317	0.190	0.897

TABLE 4 Elongation at Yield, %, for Eight Laboratories, Three Materials

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Cellulose acetate butyrate	3.65	0.27	0.62	0.76	1.75
Acrylic	4.89	0.21	0.55	0.59	1.56
Polypropylene	8.79	0.45	5.86	1.27	16.5

10.3.1.3 Make simultaneous measurements of load and strain and record the data. The precision of the value of Poisson's ratio will depend on the number of data points of axial and transverse strain taken.

10.4 Set the speed of testing at the proper rate as required in Section 8, and start the machine.

10.5 Record the load-extension curve of the specimen.

10.6 Record the load and extension at the yield point (if one exists) and the load and extension at the moment of rupture.

NOTE 14—If it is desired to measure both modulus and failure properties (yield or break, or both), it may be necessary, in the case of highly extensible materials, to run two independent tests. The high magnification extensometer normally used to determine properties up to the yield point may not be suitable for tests involving high extensibility. If allowed to remain attached to the specimen, the extensometer could be permanently damaged. A broad-range incremental extensometer or hand-rule technique may be needed when such materials are taken to rupture.

11. Calculation

11.1 Toe compensation shall be made in accordance with Annex A1, unless it can be shown that the toe region of the curve is not due to the take-up of slack, seating of the specimen, or other artifact, but rather is an authentic material response.

11.2 *Tensile Strength*—Calculate the tensile strength by dividing the maximum load in newtons (or pounds-force) by the original minimum cross-sectional area of the specimen in square metres (or square inches). Express the result in pascals (or pounds-force per square inch) and report it to three significant figures as tensile strength at yield or tensile strength at break, whichever term is applicable. When a nominal yield or break load less than the maximum is present and applicable, it may be desirable also to calculate, in a similar manner, the corresponding tensile stress at yield or tensile stress at break and report it to three significant figures (see Note A2.8).

11.3 Elongation values are valid and are reported in cases where uniformity of deformation within the specimen gage length is present. Elongation values are quantitatively relevant and appropriate for engineering design. When non-uniform deformation (such as necking) occurs within the specimen gage length nominal strain values are reported. Nominal strain values are of qualitative utility only.

shall be calculated whenever possible. However, for materials where no proportionality is evident, the secant value shall be calculated. Draw the tangent as directed in A1.3 and Fig. A1.2, and mark off the designated strain from the yield point where the tangent line goes through zero stress. The stress to be used in the calculation is then determined by dividing the load-extension curve by the original average cross-sectional area of

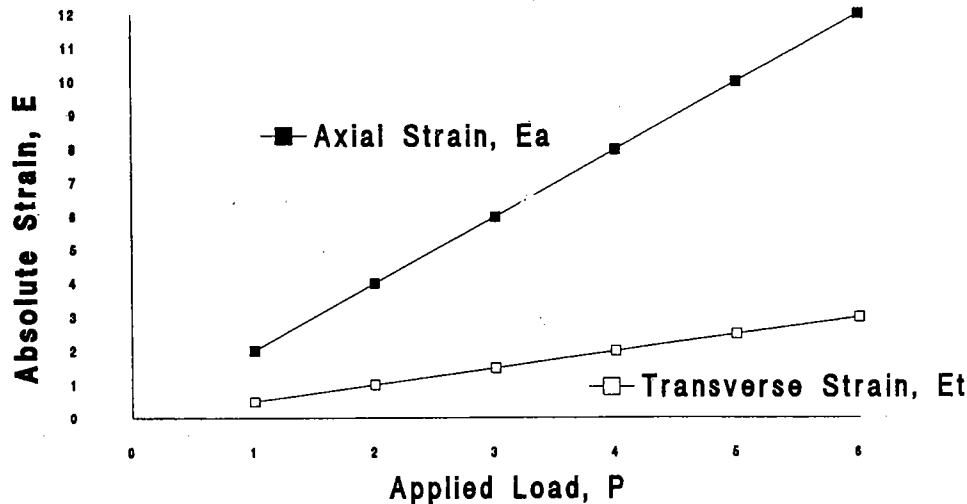


FIG. 4 Plot of Strains Versus Load for Determination of Poisson's Ratio

11.3.1 *Percent Elongation*—Percent elongation is the change in gage length relative to the original specimen gage length, expressed as a percent. Percent elongation is calculated using the apparatus described in 5.2.

11.3.1.1 *Percent Elongation at Yield*—Calculate the percent elongation at yield by reading the extension (change in gage length) at the yield point. Divide that extension by the original gage length and multiply by 100.

11.3.1.2 *Percent Elongation at Break*—Calculate the percent elongation at break by reading the extension (change in gage length) at the point of specimen rupture. Divide that extension by the original gage length and multiply by 100.

11.3.2 *Nominal Strain*—Nominal strain is the change in grip separation relative to the original grip separation expressed as a percent. Nominal strain is calculated using the apparatus described in 5.1.7.

11.3.2.1 *Nominal strain at break*—Calculate the nominal strain at break by reading the extension (change in grip separation) at the point of rupture. Divide that extension by the original grip separation and multiply by 100.

11.4 *Modulus of Elasticity*—Calculate the modulus of elasticity by extending the initial linear portion of the load-extension curve and dividing the difference in stress corresponding to any segment of section on this straight line by the corresponding difference in strain. All elastic modulus values shall be computed using the average initial cross-sectional area of the test specimens in the calculations. The result shall be expressed in pascals (pounds-force per square inch) and reported to three significant figures.

11.5 *Secant Modulus*—At a designated strain, this shall be calculated by dividing the corresponding stress (nominal) by the designated strain. Elastic modulus values are preferable and

the specimen.

11.6 *Poisson's Ratio*—The axial strain, ϵ_a , indicated by the axial extensometer, and the transverse strain, ϵ_t , indicated by the transverse extensometers, are plotted against the applied load, P , as shown in Fig. 4. A straight line is drawn through each set of points, and the slopes, $d\epsilon_a / dP$ and $d\epsilon_t / dP$, of these lines are determined. Poisson's ratio, μ , is then calculated as follows:

$$\mu = -(d\epsilon_t / dP) / (d\epsilon_a / dP) \quad (1)$$

where:

$d\epsilon_t$ = change in transverse strain,
 $d\epsilon_a$ = change in axial strain, and
 dP = change in applied load;

or

$$\mu = -(d\epsilon_t) / (d\epsilon_a) \quad (2)$$

11.6.1 The errors that may be introduced by drawing a straight line through the points can be reduced by applying the method of least squares.

11.7 For each series of tests, calculate the arithmetic mean of all values obtained and report it as the "average value" for the particular property in question.

11.8 Calculate the standard deviation (estimated) as follows and report it to two significant figures:

$$s = \sqrt{(\sum X^2 - n\bar{X}^2) / (n - 1)} \quad (3)$$

where:

s = estimated standard deviation,
 X = value of single observation,

n = number of observations, and
 \bar{X} = arithmetic mean of the set of observations.

11.9 See Annex A1 for information on toe compensation.

TABLE 5 Tensile Strength at Break, 10^3 psi, for Eight Laboratories, Five Materials^A

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Polypropylene	2.97	1.54	1.65	4.37	4.66
Cellulose acetate butyrate	4.82	0.058	0.180	0.164	0.509
Acrylic	9.09	0.452	0.751	1.27	2.13
Glass-reinforced polyester	20.8	0.233	0.437	0.659	1.24
Glass-reinforced nylon	23.6	0.277	0.698	0.784	1.98

^A Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 6 Elongation at Break, %, for Eight Laboratories, Five Materials^A

	Mean	S_r	S_R	I_r	I_R
Glass-reinforced polyester	3.68	0.20	2.33	0.570	6.59
Glass-reinforced nylon	3.87	0.10	2.13	0.283	6.03
Acrylic	13.2	2.05	3.65	5.80	10.3
Cellulose acetate butyrate	14.1	1.87	6.62	5.29	18.7
Polypropylene	293.0	50.9	119.0	144.0	337.0

^A Tensile strength and elongation at break values obtained for unreinforced propylene plastics generally are highly variable due to inconsistencies in necking or "drawing" of the center section of the test bar. Since tensile strength and elongation at yield are more reproducible and relate in most cases to the practical usefulness of a molded part, they are generally recommended for specification purposes.

TABLE 7 Tensile Yield Strength, for Ten Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	1544	52.4	64.0	146.6	179.3
LDPE	20	1894	53.1	61.2	148.7	171.3
LLDPE	20	1879	74.2	99.9	207.8	279.7
LLDPE	20	1791	49.2	75.8	137.9	212.3
LLDPE	20	2900	55.5	87.9	155.4	246.1
LLDPE	20	1730	63.9	96.0	178.9	268.7
HDPE	2	4101	196.1	371.9	549.1	1041.3
HDPE	2	3523	175.9	478.0	492.4	1338.5

12. Report

12.1 Report the following information:

12.1.1 Complete identification of the material tested, including type, source, manufacturer's code numbers, form, principal dimensions, previous history, etc.,

12.1.2 Method of preparing test specimens,

12.1.3 Type of test specimen and dimensions,

12.1.4 Conditioning procedure used,

12.1.5 Atmospheric conditions in test room,

12.1.6 Number of specimens tested,

12.1.7 Speed of testing,

12.1.8 Classification of extensometers used. A description of measuring technique and calculations employed instead of a minimum Class-C extensometer system,

12.1.9 Tensile strength at yield or break, average value, and standard deviation,

12.1.10 Tensile stress at yield or break, if applicable, average value, and standard deviation,

12.1.11 Percent elongation at yield, or break, or nominal strain at break, or all three, as applicable, average value, and standard deviation,

12.1.12 Modulus of elasticity, average value, and standard deviation,

12.1.13 Date of test, and

12.1.14 Revision date of Test Method D 638.

13. Precision and Bias¹²

13.1 *Precision*—Tables 2-6 are based on a round-robin test conducted in 1984, involving five materials tested by eight laboratories using the Type I specimen, all of nominal 0.125-in. thickness. Each test result was based on five individual determinations. Each laboratory obtained two test results for each material.

TABLE 8 Tensile Yield Elongation, for Eight Laboratories, Eight Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	17.0	1.26	3.16	3.52	8.84
LDPE	20	14.6	1.02	2.38	2.86	6.67
LLDPE	20	15.7	1.37	2.85	3.85	7.97
LLDPE	20	16.6	1.59	3.30	4.46	9.24
LLDPE	20	11.7	1.27	2.88	3.56	8.08
LLDPE	20	15.2	1.27	2.59	3.55	7.25
HDPE	2	9.27	1.40	2.84	3.91	7.94
HDPE	2	9.63	1.23	2.75	3.45	7.71

TABLE 9 Tensile Break Strength, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in psi Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	1592	52.3	74.9	146.4	209.7
LDPE	20	1750	66.6	102.9	186.4	288.1
LLDPE	20	4379	127.1	219.0	355.8	613.3
LLDPE	20	2840	78.6	143.5	220.2	401.8
LLDPE	20	1679	34.3	47.0	95.96	131.6
LLDPE	20	2660	119.1	166.3	333.6	465.6

13.1.1 Tables 7-10 are based on a round-robin test conducted by the polyolefin subcommittee in 1988, involving eight polyethylene materials tested in ten laboratories. For each material, all samples were molded at one source, but the individual specimens were prepared at the laboratories that tested them. Each test result was the average of five individual determinations. Each laboratory obtained three test results for each material. Data from some laboratories could not be used for various reasons, and this is noted in each table.

13.1.2 In Tables 2-10, for the materials indicated, and for test results that derived from testing five specimens:

¹² Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D20-1125 for the 1984 round robin and RR:D20-1170 for the 1988 round robin.

TABLE 10 Tensile Break Elongation, for Nine Laboratories, Six Materials

Material	Test Speed, in./min	Values Expressed in Percent Units				
		Average	S_r	S_R	r	R
LDPE	20	567	31.5	59.5	88.2	166.6
LDPE	20	569	61.5	89.2	172.3	249.7
LLDPE	20	890	25.7	113.8	71.9	318.7
LLDPE	20	64.4	6.68	11.7	18.7	32.6
LLDPE	20	803	25.7	104.4	71.9	292.5
LLDPE	20	782	41.6	96.7	116.6	270.8

13.1.2.1 S_r is the within-laboratory standard deviation of the average; $I_r = 2.83 S_r$. (See 13.1.2.3 for application of I_r .)

13.1.2.2 S_R is the between-laboratory standard deviation of the average; $I_R = 2.83 S_R$. (See 13.1.2.4 for application of I_R .)

13.1.2.3 *Repeatability*—In comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material and condition.

13.1.2.4 *Reproducibility*—In comparing two test results for the same material, obtained by different operators using differ-

ent equipment on different days, those test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material and condition. (This applies between different laboratories or between different equipment within the same laboratory.)

13.1.2.5 Any judgment in accordance with 13.1.2.3 and 13.1.2.4 will have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

13.1.2.6 Other formulations may give somewhat different results.

13.1.2.7 For further information on the methodology used in this section, see Practice E 691.

13.1.2.8 The precision of this test method is very dependent upon the uniformity of specimen preparation, standard practices for which are covered in other documents.

13.2 *Bias*—There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

14. Keywords

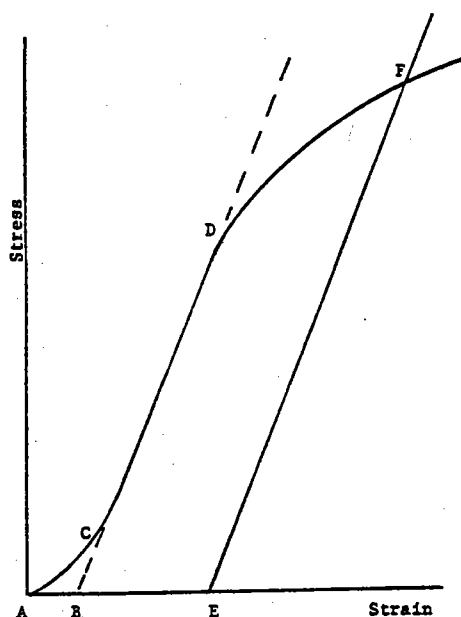
14.1 modulus of elasticity; percent elongation; plastics; tensile properties; tensile strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. TOE COMPENSATION

A1.1 In a typical stress-strain curve (Fig. A1.1) there is a toe region, AC, that does not represent a property of the

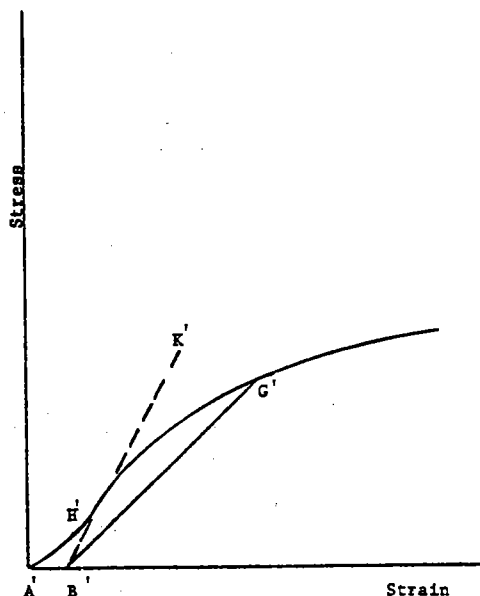


NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.
FIG. A1.1 Material with Hookean Region

material. It is an artifact caused by a takeup of slack and alignment or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as modulus, strain, and offset yield point, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the strain or extension axis.

A1.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (Fig. A1.1), a continuation of the linear (CD) region of the curve is constructed through the zero-stress axis. This intersection (B) is the corrected zero-strain point from which all extensions or strains must be measured, including the yield offset (BE), if applicable. The elastic modulus can be determined by dividing the stress at any point along the line CD (or its extension) by the strain at the same point (measured from Point B, defined as zero-strain).

A1.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (Fig. A1.2), the same kind of toe correction of the zero-strain point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection point (H'). This is extended to intersect the strain axis at Point B' , the corrected zero-strain point. Using Point B' as zero strain, the stress at any point (G') on the curve can be divided by the strain at that point to obtain a secant modulus (slope of Line $B' G'$). For those materials with no linear region, any attempt to use the tangent through the inflection point as a basis for determination of an offset yield point may result in unacceptable error.



NOTE 1—Some chart recorders plot the mirror image of this graph.

FIG. A1.2 Material with No Hookean Region

A2. DEFINITIONS OF TERMS AND SYMBOLS RELATING TO TENSION TESTING OF PLASTICS

A2.1 elastic limit—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any permanent strain remaining upon complete release of the stress. It is expressed in force per unit area, usually pounds-force per square inch (megapascals).

NOTE A2.1—Measured values of proportional limit and elastic limit vary greatly with the sensitivity and accuracy of the testing equipment, eccentricity of loading, the scale to which the stress-strain diagram is plotted, and other factors. Consequently, these values are usually replaced by yield strength.

A2.2 elongation—the increase in length produced in the gage length of the test specimen by a tensile load. It is expressed in units of length, usually inches (millimetres). (Also known as *extension*.)

NOTE A2.2—Elongation and strain values are valid only in cases where uniformity of specimen behavior within the gage length is present. In the case of materials exhibiting necking phenomena, such values are only of qualitative utility after attainment of yield point. This is due to inability to ensure that necking will encompass the entire length between the gage marks prior to specimen failure.

A2.3 gage length—the original length of that portion of the specimen over which strain or change in length is determined.

A2.4 modulus of elasticity—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain below the proportional limit of a material. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch). (Also known as *elastic modulus* or *Young's modulus*).

NOTE A2.3—The stress-strain relations of many plastics do not conform to Hooke's law throughout the elastic range but deviate therefrom even at stresses well below the elastic limit. For such materials the slope of the tangent to the stress-strain curve at a low stress is usually taken as the modulus of elasticity. Since the existence of a true proportional limit

in plastics is debatable, the propriety of applying the term "modulus of elasticity" to describe the stiffness or rigidity of a plastic has been seriously questioned. The exact stress-strain characteristics of plastic materials are very dependent on such factors as rate of stressing, temperature, previous specimen history, etc. However, such a value is useful if its arbitrary nature and dependence on time, temperature, and other factors are realized.

A2.5 necking—the localized reduction in cross section which may occur in a material under tensile stress.

A2.6 offset yield strength—the stress at which the strain exceeds by a specified amount (the offset) an extension of the initial proportional portion of the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

NOTE A2.4—This measurement is useful for materials whose stress-strain curve in the yield range is of gradual curvature. The offset yield strength can be derived from a stress-strain curve as follows (Fig. A2.1):

On the strain axis lay off OM equal to the specified offset.

Draw OA tangent to the initial straight-line portion of the stress-strain curve.

Through M draw a line MN parallel to OA and locate the intersection of MN with the stress-strain curve.

The stress at the point of intersection r is the "offset yield strength." The specified value of the offset must be stated as a percent of the original gage length in conjunction with the strength value. *Example:* 0.1 % offset yield strength = ... MPa (psi), or yield strength at 0.1 % offset ... MPa (psi).

A2.7 percent elongation—the elongation of a test specimen expressed as a percent of the gage length.

A2.8 percent elongation at break and yield:

A2.8.1 percent elongation at break—the percent elongation at the moment of rupture of the test specimen.

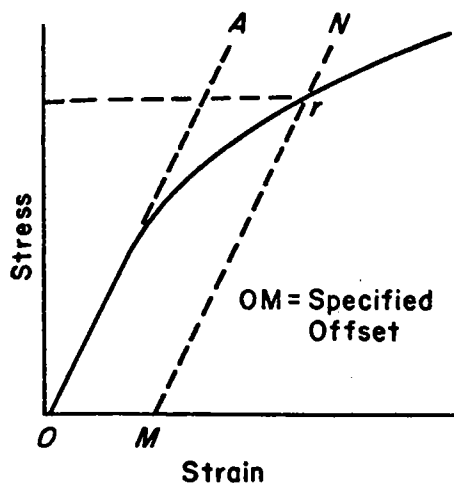


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

A2.8.2 *percent elongation at yield*—the percent elongation at the moment the yield point (A2.21) is attained in the test specimen.

A2.9 *percent reduction of area (nominal)*—the difference between the original cross-sectional area measured at the point of rupture after breaking and after all retraction has ceased, expressed as a percent of the original area.

A2.10 *percent reduction of area (true)*—the difference between the original cross-sectional area of the test specimen and the minimum cross-sectional area within the gage boundaries prevailing at the moment of rupture, expressed as a percentage of the original area.

A2.11 *proportional limit*—the greatest stress which a material is capable of sustaining without any deviation from proportionality of stress to strain (Hooke's law). It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

A2.12 *rate of loading*—the change in tensile load carried by the specimen per unit time. It is expressed in force per unit time, usually newtons (pounds-force) per minute. The initial rate of loading can be calculated from the initial slope of the load versus time diagram.

A2.13 *rate of straining*—the change in tensile strain per unit time. It is expressed either as strain per unit time, usually metres per metre (inches per inch) per minute, or percent elongation per unit time, usually percent elongation per minute. The initial rate of straining can be calculated from the initial slope of the tensile strain versus time diagram.

NOTE A2.5—The initial rate of straining is synonymous with the rate of crosshead movement divided by the initial distance between crossheads only in a machine with constant rate of crosshead movement and when the specimen has a uniform original cross section, does not "neck down," and does not slip in the jaws.

A2.14 *rate of stressing (nominal)*—the change in tensile stress (nominal) per unit time. It is expressed in force per unit area per unit time, usually megapascals (pounds-force per

square inch) per minute. The initial rate of stressing can be calculated from the initial slope of the tensile stress (nominal) versus time diagram.

NOTE A2.6—The initial rate of stressing as determined in this manner has only limited physical significance. It does, however, roughly describe the average rate at which the initial stress (nominal) carried by the test specimen is applied. It is affected by the elasticity and flow characteristics of the materials being tested. At the yield point, the rate of stressing (true) may continue to have a positive value if the cross-sectional area is decreasing.

A2.15 *secant modulus*—the ratio of stress (nominal) to corresponding strain at any specified point on the stress-strain curve. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch), and reported together with the specified stress or strain.

NOTE A2.7—This measurement is usually employed in place of modulus of elasticity in the case of materials whose stress-strain diagram does not demonstrate proportionality of stress to strain.

A2.16 *strain*—the ratio of the elongation to the gage length of the test specimen, that is, the change in length per unit of original length. It is expressed as a dimensionless ratio.

A2.16.1 *nominal strain at break*—the strain at the moment of rupture relative to the original grip separation.

A2.17 *tensile strength (nominal)*—the maximum tensile stress (nominal) sustained by the specimen during a tension test. When the maximum stress occurs at the yield point (A2.21), it shall be designated tensile strength at yield. When the maximum stress occurs at break, it shall be designated tensile strength at break.

A2.18 *tensile stress (nominal)*—the tensile load per unit area of minimum original cross section, within the gage boundaries, carried by the test specimen at any given moment. It is expressed in force per unit area, usually megapascals (pounds-force per square inch).

NOTE A2.8—The expression of tensile properties in terms of the minimum original cross section is almost universally used in practice. In the case of materials exhibiting high extensibility or necking, or both (A2.15), nominal stress calculations may not be meaningful beyond the yield point (A2.21) due to the extensive reduction in cross-sectional area that ensues. Under some circumstances it may be desirable to express the tensile properties per unit of minimum prevailing cross section. These properties are called true tensile properties (that is, true tensile stress, etc.).

A2.19 *tensile stress-strain curve*—a diagram in which values of tensile stress are plotted as ordinates against corresponding values of tensile strain as abscissas.

A2.20 *true strain* (see Fig. A2.2) is defined by the following equation for ϵ_T :

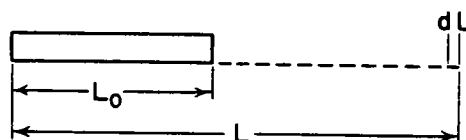


FIG. A2.2 Illustration of True Strain Equation

$$\epsilon_T = \int_{L_0}^L dL/L = \ln L/L_0 \quad (A2.1)$$

where:

dL = increment of elongation when the distance between the gage marks is L ,
 L_0 = original distance between gage marks, and
 L = distance between gage marks at any time.

A2.21 yield point—the first point on the stress-strain curve at which an increase in strain occurs without an increase in stress (Fig. A2.2).

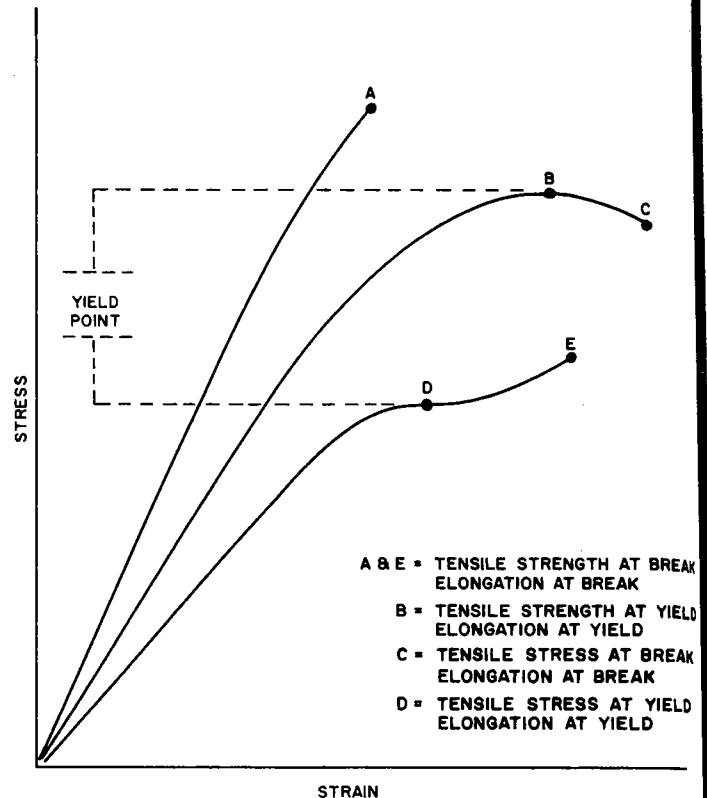
NOTE A2.9—Only materials whose stress-strain curves exhibit a point of zero slope may be considered as having a yield point.

NOTE A2.10—Some materials exhibit a distinct “break” or discontinuity in the stress-strain curve in the elastic region. This break is not a yield point by definition. However, this point may prove useful for material characterization in some cases.

A2.22 yield strength—the stress at which a material exhibits a specified limiting deviation from the proportionality of stress to strain. Unless otherwise specified, this stress will be the stress at the yield point and when expressed in relation to the tensile strength shall be designated either tensile strength at yield or tensile stress at yield as required in A2.17 (Fig. A2.3). (See *offset yield strength*.)

A2.23 Symbols—The following symbols may be used for the above terms:

Symbol	Term
W	Load
ΔW	Increment of load
L	Distance between gage marks at any time
L_0	Original distance between gage marks
L_u	Distance between gage marks at moment of rupture
ΔL	Increment of distance between gage marks = elongation
A	Minimum cross-sectional area at any time
A_0	Original cross-sectional area
ΔA	Increment of cross-sectional area
A_u	Cross-sectional area at point of rupture measured after breaking specimen
A_T	Cross-sectional area at point of rupture, measured at the moment of rupture
t	Time
Δt	Increment of time
σ	Tensile stress
$\Delta \sigma$	Increment of stress
σ_T	True tensile stress
σ_U	Tensile strength at break (nominal)
σ_{UT}	Tensile strength at break (true)
ϵ	Strain
$\Delta \epsilon$	Increment of strain
ϵ_U	Total strain, at break
ϵ_T	True strain
$\%EI$	Percentage elongation
Y.P.	Yield point
E	Modulus of elasticity



A2.24 Relations between these various terms may be defined as follows:

$$\begin{aligned} \sigma &= W/A_0 \\ \sigma_T &= W/A \\ \sigma_U &= W/A_0 \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \sigma_{UT} &= W/A_T \text{ (where } W \text{ is breaking load)} \\ \epsilon &= \Delta L/L_0 = (L - L_0)/L_0 \\ \epsilon_U &= (L_u - L_0)/L_0 \\ \epsilon_T &= \int_{L_0}^L dL/L = \ln L/L_0 \\ \%EI &= [(L - L_0)/L_0] \times 100 = \epsilon \times 100 \end{aligned}$$

Percent reduction of area (nominal) = $[(A_0 - A_u)/A_0] \times 100$

Percent reduction of area (true) = $[(A_0 - A_T)/A_0] \times 100$

Rate of loading = $\Delta W/\Delta t$

Rate of stressing (nominal) = $\Delta \sigma/\Delta t = (\Delta W)/A_0/\Delta t$

Rate of straining = $\Delta \epsilon/\Delta t = (\Delta L/L_0)/\Delta t$

For the case where the volume of the test specimen does not change during the test, the following three relations hold:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma(1 + \epsilon) = \sigma L/L_0 \quad (A2.2) \\ \sigma_{UT} &= \sigma_U(1 + \epsilon_U) = \sigma_U L_u/L_0 \\ A &= A_0/(1 + \epsilon) \end{aligned}$$

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Arif Imbang Pambudi, dilahirkan di Tegal pada tanggal 22 Mei 1995, merupakan putra tunggal dari Pono Suharto dan Atika Aminingsih. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Taruna Ihsaniyah Tegal dan MI Negeri Brebes, SMP Ihsaniyah Tegal, dan SMA N 1 Tegal. Setelah lulus, penulis mendaftar dan diterima sebagai mahasiswa program studi S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun 2013 dan terdaftar secara administrasi dengan NRP 27131000032. Selama menjalankan pendidikan di ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi Badan Semi Otonom Mateial techno Club Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI-ITS sebagai General Manager dari Tim Riset kendaraan hemat energi Antasena pada tahun 2015 - 2016. Selain itu, penulis juga aktif dalam aktifitas akademik sebagai asisten praktikum Material Polimer dan Material Komposit. Penulis juga aktif dalam kegiatan karya tulis ilmiah, antara lain program PKM DIKTI pada Bidang Penelitian dan Bidang Kewirausahaan. Penulis juga sempat menjadi Beswan atau sebutan bagi penerima Program Beasiswa Plus Djarum Bakti Pendidikan 2015 – 2016. Penulis juga pernah melaksanakan kerja praktek di *Joint Operating Body* PT. Pertamina – PetroChina, East Java. Penulis mengakhiri kegiatan perkuliahan di ITS dengan mengambil judul Tugas Akhir “*Analisis Pengaruh Internal Geometri Terhadap Sifat Mekanik Material Polylactic Acid Dipreparasi Menggunakan 3D Printing*”. Alamat penulis saat ini adalah Perumahan Nasional Jalan Mawar 52, Gandasuli – Brebes, 52215. Kontak penulis yang dapat dihubungi adalah 085642768014 atau *email* imbangp@gmail.com.